



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

-PROYECTO FIN DE CARRERA-

Estudio acústico de las aulas abovedadas en el Edificio Sabatini de la Universidad Carlos III de Madrid

Autor: Manuel Vázquez Rosado.

Tutor: Sergio Sanz Rodríguez-Escalona.

Leganés, Julio 2011

Título: Estudio acústico de las aulas abovedadas en el Edificio Sabatini de la Universidad Carlos III de Madrid.

Autor: Manuel Vázquez Rosado.

Tutor: Sergio Sanz Rodríguez-Escalona.

EL TRIBUNAL

Presidente: Luis Azpicueta Ruiz

Vocal: Jose Alfonso Artero Guerrero

Secretario: Eduardo Martínez Enriquez

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 26 de Julio de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de MATRICULA DE HONOR.

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Resumen

El presente documento trata sobre el estudio acústico de veinte aulas situadas en la tercera planta del Edificio Sabatini de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, la cual se encuentra situada en la localidad madrileña de Leganés (España).

Estas aulas son, como casi todas, de tipo rectangular, aunque el techo presenta una estructura en forma de bóveda de cañón que puede incluso influir negativamente en la acústica de las mismas debido a posibles concentraciones sonoras en ciertos puntos del recinto. Sin embargo, el principal causante de esa pérdida intolerable de la inteligibilidad o claridad del mensaje oral en el interior de las aulas es de hecho el tiempo de reverberación, el cual excede el rango de valores recomendados para este tipo de recintos. Concretamente, las aulas del Edificio Sabatini se dividen en dos grupos, doce aulas pequeñas y ocho grandes, por lo que se estudiarán y se propondrán mejoras para ambos tipos por separado.

Con objeto de mejorar las condiciones acústicas de estas aulas, se han llevado a cabo las siguientes tareas. En primer lugar, se han identificado las posibles deficiencias en la acústica de las aulas mediante mediciones “in situ” y posterior estudio del campo sonoro por ordenador mediante un software específico de simulación acústica. A continuación, se han propuesto varias mejoras posibles para cada uno de los dos tipos de aula teniendo muy en cuenta la relación calidad acústica / coste de ejecución de la obra. En particular, tres mejoras se han propuesto: una solución óptima, una solución económica, y una solución cambiando el techo abovedado por un techo acústico

Palabras claves: acústica, sonido, acondicionamiento, aulas, absorción, reverberación, superficies curvas, Sabatini.

Abstract

This work aims to study the acoustic characteristics of twenty classrooms located on the third floor of the Sabatini Building in the Leganés Campus that houses the School of Engineering of the Carlos III University of Madrid (Spain).

These classrooms have a rectangular shape, but their barrel vaulted ceilings might influence negatively on the acoustic quality inside them due to potential concentrations of sound energy at specific areas. However, the main responsible for that intolerable loss in speech intelligibility or clarity inside the classrooms is actually the reverberation time, which is higher than the recommended values for this kind of rooms. Specifically, the classrooms are divided into two groups: twelve small classrooms, and eight large classrooms. Their sound fields will be studied and improved separately.

In order to improve the acoustic conditions of these classrooms, the following operation tasks have been conducted. In the first task the acoustic deficiencies within the classrooms have been identified by means of some in situ measurements of sound field and subsequent computer simulation using specific software. Then, several improvements have been proposed for each type of classroom taking into account different trade-offs between acoustic quality and economic expense. In particular, three improvements have been proposed: an optimal solution, an economic solution, and a solution that replaces the barrel vaulted ceiling by an acoustic ceiling.

Keywords: acoustics, sound, insulation, classroom, absorption, reverberation, curved surfaces, Sabatini.

0. INTRODUCCIÓN.....	17
0.0. Introducción.....	19
0.1. Objetivos.....	19
0.2 Organización.....	19
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
1.0 Introducción.....	23
1.1 Propagación del sonido en recintos cerrados.....	23
1.2 Teorías acústicas.....	25
1.2.1 Teoría estadística	26
I - Coeficiente de absorción medio.....	27
II – Tiempo de reverberación	28
III – Corrección de Eyring.....	29
IV – Corrección de Millington-Sette	29
V - Conclusiones	30
1.2.2. Teoría geométrica.....	30
I – Consideraciones generales	32
II – Leyes geométricas de propagación	32
III - Fuentes de onda incidente: fuentes imagen.....	34
IV. Reflexiones en superficies curvas	35
1.2.3. Teoría ondulatoria.....	36
I – Consideraciones generales	36
II – Campo sonoro en salas rectangulares	37
III – Modos propios	40
1.2.4. Teoría psicoacústica	41
I – Consideraciones generales	42
II – Anatomía del oído.....	42
III – Funcionamiento del oído	42
IV - Sonoridad	43
V – Enmascaramiento del sonido	45
VI – El eco.....	45
1.3 Sistema de fonación humana	46
1.3.1. Anatomía de la voz	46
1.3.2. Características del mensaje oral	47
1.3.3. Directividad de la voz humana	48
1.4. Características de salas para la palabra.....	49
1.4.1 Nivel de presión sonora	49
1.4.2. Tiempo de reverberación	50
1.4.3. Brillo y calidez	52
1.4.4. Tiempo de caída inicial (EDT)	52
1.4.5. Intimidad (ITDG)	53
1.4.6. Claridad de la voz (C_{50}).....	53
1.4.7. Definición (D)	54
1.4.8. Pérdida de articulación de consonantes (ALCons%)	54
1.4.9. Índice de transmisión del habla (STI).....	57
1.4.10 Criterio de ruido	58
2. NORMATIVA ESPAÑOLA SOBRE ACÚSTICA EN AULAS	60
2.0 Introducción.....	63
2.1 El Documento Básico de Protección frente al ruido.....	63

3. LAS AULAS	67
3.0 Introducción.....	69
3.1 Historia	69
3.2 Situación.....	70
3.3. Descripción de las aulas	71
3.2.1 Aulas pequeñas	71
3.2.2 Aulas grandes	73
4. MEDIDAS “IN SITU”	77
4.0 Introducción.....	79
4.1 Material necesario.....	79
4.1.1. Symphonie	79
4.1.2. Micrófono	80
4.1.3. Preamplificador	80
4.1.4. Generador de ruido rosa	80
4.1.5. Fuente dodecaédrica	81
4.1.6. Amplificador de potencia	82
4.2. Montaje y procedimiento.....	82
4.3. Medida del ruido de fondo.....	83
4.4. Medida del tiempo de reverberación	84
5. SIMULACIÓN ACÚSTICA DE LAS AULAS	89
5.0 Introducción.....	91
5.1 Descripción del programa: EASE.....	91
5.1.1 Módulo principal	92
5.1.2. Editor de Proyectos (<i>Edit Project</i>)	92
5.1.3. Módulo Eyes.....	93
5.1.4. Módulo Area Mapping	94
5.1.5. Módulo Ray Tracing.....	95
5.1.6. Edición de materiales.....	96
5.2 Proceso de creación de las aulas.....	96
5.2.1. Nivel de detalle.....	97
I- Experimento I.....	98
II - Experimento II.....	99
III - Experimento III	100
IV - Experimento IV	100
5.2.2. Aula pequeña	102
5.2.3. Aula Grande.....	103
5.3. Ajuste del modelo.....	103
5.3.1. Materiales iniciales.....	103
I – Baldosa suelo	105
II – Cristal ventana	106
III – Cristal-Metal de las puertas	107
IV – Forrado techo.....	108
V – Madera	109
VI - Pared	110
VII – Pizarra	111
VIII – Pupitres	112
IX – Zócalo pared	113

5.3.2. Cómo ajustar un modelo.....	114
5.3.3. Materiales finales.....	116
I - Aulas pequeñas	116
II- Aulas grandes	116
5.4 Estudio de concentraciones sonoras	117
5.5. Resultados de la simulación	119
5.5.1. Tiempo de reverberación	120
5.5.2. Ruido de fondo.	120
5.5.3. Brillo y calidez.	121
5.5.4. Tiempo de caída inicial.....	121
5.5.5. Claridad de la voz.	122
5.5.6. Definición	123
5.5.7. Pérdida de articulación de consonantes.	123
5.5.8. Índice de transmisión del habla	124
6. POSIBLES MEJORAS	125
6.0. Introducción.....	127
6.1. Aulas pequeñas.	127
6.1.1. Solución óptima.....	127
6.1.2. Solución económica.....	131
6.1.3. Techo acústico	133
6.2. Aulas grandes	136
6.2.1. Solución óptima.....	136
6.2.2. Solución económica.....	139
6.2.3. Solución con techo acústico	141
6.3. Presupuesto.....	143
6.3.1. Solución óptima.....	143
6.3.2. Solución económica.....	145
6.3.3. Solución con techo acústico	147
7. Conclusiones y trabajo futuro.....	151
7.0. Introducción.....	153
7.1. Resumen	153
7.2. Conclusiones.....	153
7.3. Trabajo futuro	154

Índice de figuras:

Figura 1 Representación del sonido directo y reflejado (arriba) y ecograma asociado (abajo).....	23
Figura 2 Ejemplo de llegada de las primeras reflexiones a un punto.	24
Figura 3 Gráfica del tiempo de reverberación.	28
Figura 4 Reflexión de rayos sonoros en superficie cóncava.	31
Figura 5 Diagrama de construcción de rayos reflejados y fuente imaginaria.	31
Figura 6 Ejemplo de difusión del sonido en función de la frecuencia.	33
Figura 7 Diagrama de aula rectangular con todas las fuentes imagen.....	34
Figura 8 Diagrama de rayos en recintos con techos: a) con radio de la curva r igual a la altura del recinto; b) con $h=2r$ y c) con $h=r/2$	35
Figura 9 Diagrama de rayos en un recinto con eco múltiple.	36
Figura 10 Distribución de ondas axiales, tangenciales y oblicuas.	39
Figura 11 Relaciones recomendadas entre las dimensiones de una sala rectangular para obtener una distribución uniforme de sus frecuencias propias.....	41
Figura 12 Anatomía del oído.	42
Figura 13 Niveles audibles en función de la frecuencia.	43
Figura 14 Curvas isofónicas de Fletcher-Munson.	44
Figura 15 Impresión subjetiva de dos sonidos con diferentes retardos.	45
Figura 16 Relación entre el retardo y el nivel de sonido directo-reflejado.	46
Figura 17 Tracto vocal y representación esquemática del mismo.....	47
Figura 18 Contribución frecuencial al nivel de la voz y la inteligibilidad de la palabra.	48
Figura 19 Directividad de la voz humana en las bandas de octava comprendidas entre 500 Hz y 4 kHz (según Moreno y Pfretzschner).	49
Figura 20 Ejemplo de diagrama de tiempo de reverberación.....	50
Figura 21 Valores recomendados de T_{mid} en función del volumen del recinto en salas de conferencias/aulas.....	51
Figura 22 Relación entre EDT y T	52
Figura 23 Obtención de ITDG a partir de un ecograma.	53
Figura 24 Pérdida de la articulación de consonantes. ALCons%.....	56
Figura 25 Intensidad de la señal de habla en un recinto en función del tiempo.....	57
Figura 26 Correlación entre STI/RASTI y ALCons%.	58
Figura 27 Gráfica y valores de las curvas NC.....	59
Figura 28 Vista en planta de las opciones de diseño de aulas 1 y 2.	66
Figura 29 Simulación 3D del edificio Sabatini de la uc3m.	69
Figura 30 a) Mapa de ubicación de la uc3m (Google maps).....	70
Figura 31 Vista desde la cara este del Sabatini.	70
Figura 32 Vista lateral desde ventanas.	71
Figura 33 Vista lateral desde las puertas.	71
Figura 34 Vista del techo desde atrás.	72
Figura 35 Vista desde la esquina trasera derecha.	72
Figura 36 Vista desde la esquina trasera izquierda.....	72
Figura 37 Vista desde la esquina trasera izquierda.....	73
Figura 38 Vista desde la esquina delantera izquierda.....	73
Figura 39 Vista lateral de las puertas.....	73
Figura 40 Vista lateral de las ventanas.	74
Figura 41 Vista desde la mesa del profesor.....	74
Figura 42 Vista del techo desde la parte trasera.	74
Figura 43 Detalle de las planchas de fibra mineral.	75

Figura 44 Unidad de adquisición Symphonie.....	79
Figura 45 Micrófono G.R.A.S. de ½" tipo 40AF.....	80
Figura 46 Preamplificador PRE 21 A de 01 dB.....	80
Figura 47 Fuente dodecaédrica.....	81
Figura 48 Diagrama polar de fuente omnidireccional para.....	81
Figura 49 Amplificador de potencia <i>InterM LI400</i>	82
Figura 50 Diagrama de conexión del equipo de medición.....	82
Figura 51 Montaje del equipo de medición.....	83
Figura 52 Valor promedio del ruido de fondo en las aulas pequeñas.....	83
Figura 53 Valor promedio del ruido de fondo en las aulas grandes.....	84
Figura 54 Vista del modulo principal de EASE (versión 4.1).....	92
Figura 55 Vista del módulo de edición de proyectos.....	93
Figura 56 Barra de herramientas del módulo edición de proyecto.....	93
Figura 57 Módulo <i>Area Mapping</i>	94
Figura 58 Botón de <i>Area Mapping</i> en la barra de herramientas de <i>Edit Project</i>	94
Figura 59 Ventana del módulo Ray Tracing.....	95
Figura 60 Ventana de opciones de Ray Tracing.....	95
Figura 61 Ventana de la aplicación <i>Wall Material</i>	96
Figura 62 Detalle de construcción de la bóveda.....	97
Figura 63 Aula para el Experimento I y tiempo de reverberación.....	99
Figura 64 Aula para el Experimento II y tiempo de reverberación.....	99
Figura 65 Aula para el Experimento III y tiempo de reverberación.....	100
Figura 66 Aula para el Experimento IV y tiempo de reverberación.....	101
Figura 67 Aula pequeña en módulo de edición.....	102
Figura 68 Aula grande en módulo de edición.....	103
Figura 69 Distribución de materiales en el aula grande.....	104
Figura 70 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> de las baldosas del suelo.....	105
Figura 71 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> del cristal de las ventana.....	106
Figura 72 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> del cristal-metal de las puertas...	107
Figura 73 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> del forrado del techo.....	108
Figura 74 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> de la mesa del profesor.....	109
Figura 75 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> de la pared.....	110
Figura 76 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> de la pizarra.....	111
Figura 77 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> de los pupitres.....	112
Figura 78 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> del zócalo de la pared.....	113
Figura 79 Ventana de <i>Room Data</i>	114
Figura 80 Ventana <i>Optimize RT</i>	115
Figura 81 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> del forrado final del Techo.....	116
Figura 82 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> del panel absorbente.....	117
Figura 83 Elipse que envuelve al techo de las aulas y focos de la misma.....	118
Figura 84 Concentraciones sonoras provocadas por la bóveda con la fuente en el centro del aula.....	118
Figura 85 Concentraciones sonoras provocadas por la bóveda con la fuente en el foco de la elipse.....	119
Figura 86 Lámina absorbente de espuma de poliuretano IPACELL.....	127
Figura 87 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> de la lámina IPACELL.....	128
Figura 88 Vista cenital de la colocación del material absorbente en el techo.....	128
Figura 89 Panel absorbente ETOILE.....	129
Figura 90 Colocación de los paneles absorbentes ETOILE.....	129
Figura 91 Coeficientes de absorción y de <i>scattering</i> de los paneles ETOILE.....	129

Figura 92 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución óptima en aulas pequeñas.....	131
Figura 93 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución económica en aulas pequeñas.	133
Figura 94 Paneles absorbentes ACUSTEC N-15.	134
Figura 95 Coeficiente de absorción y de <i>scattering</i> de ACUSTEC N-15.	134
Figura 96 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución con techo acústico en aulas pequeñas.	136
Figura 97 Distribución de materiales absorbentes en las aulas grandes.....	137
Figura 98 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución óptima en aulas grandes.	138
Figura 99 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución económica en aulas grandes.	140
Figura 100 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución de techo acústico en aulas grandes..	142
Figura 101 Resumen de presupuestos.	149

Índice de tablas:

Tabla 1 Valores de corrección de la curva de ponderación A en tercios de octava.	50
Tabla 2 Valoración subjetiva del ALCons%.	56
Tabla 3 Valoración subjetiva del STI/ RASTI.	58
Tabla 4 Curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recintos.	59
Tabla 5 Valores recomendados de aislamiento a ruido aéreo $D_{2m, nT, Atr}$ entre un recinto protegido y el exterior.....	64
Tabla 6 Número mínimo de posiciones y mediciones [13].	85
Tabla 7 Resultados del tiempo de reverberación para todos los puntos medidos en el aula pequeña e incertidumbre.....	86
Tabla 8 Resultados del tiempo de reverberación para todos los puntos medidos en el aula grande e incertidumbre.	87
Tabla 9 Comparativa de SPL total, C_{50} y ALCons% para experimentos I, II, III y IV.	101
Tabla 10 Tiempos de reverberación de aulas grandes y pequeñas.	120
Tabla 11 Ruido de fondo aulas grandes y pequeñas.....	120
Tabla 12 Resultados de Brillo y Calidez.	121
Tabla 13 Valores de EDT para ambas aulas en tercios de octavas y valores medios. ..	121
Tabla 14 Valores de C_{50} para ambas aulas en tercios de octavas y valores medios.....	122
Tabla 15 Resultados de la simulación para la definición (D).....	123
Tabla 16 Resultados de ALCons% para ambas aulas calculados mediante en método de mayor precisión mostrado en la ecuación (1.49).	123
Tabla 17 Resultados de RASTI para ambas aulas.	124
Tabla 18 Resultados de la solución óptima para las aulas pequeñas.....	130
Tabla 19 Resultados de la solución económica para las aulas pequeñas.....	132
Tabla 20 Resultados de la solución con techo acústico para las aulas pequeñas.	135
Tabla 21 Resultados de la solución óptima para las aulas grandes.	137
Tabla 22 Resultados de la solución económica para las aulas grandes.	139
Tabla 23 Resultados del techo acústico para las aulas grandes.	141

0. INTRODUCCIÓN

0.0. Introducción

Las aulas de la tercera planta del Edificio Sabatini situado en la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), la cual se encuentra situada en la localidad madrileña de Leganés (España), presentan unas pésimas condiciones acústicas que hacen que la inteligibilidad de la palabra sea muy pobre, lo cual es bastante ilógico en un recinto dedicado íntegramente a la docencia.

0.1. Objetivos

Este proyecto fin de carrera trata de estudiar exhaustivamente el campo sonoro producido en el interior de las aulas arriba especificadas. En particular, estudiaremos la influencia de la geometría del techo, debido a que su forma abovedada podría incluso ocasionar ciertas concentraciones indeseables de energía sonora en puntos específicos de las aulas. No obstante, tampoco debemos olvidarnos del resto de elementos constructivos, ya que sus propiedades de absorción acústica influyen directamente en el excesivo tiempo de reverberación que presentan las aulas y, por tanto, negativamente en la inteligibilidad del mensaje oral.

Una vez identificados los problemas acústicos derivados de la geometría y/o los elementos constructivos de las aulas, aportaremos soluciones que permitan mejorar las condiciones acústicas para proporcionar unas mejores garantías de inteligibilidad sonora. Sin embargo, el coste económico asociado a la ejecución de la obra será también un factor clave a tener en cuenta en este proyecto a la hora de proporcionar soluciones viables, ya que, pese a que el objetivo final siempre ha de ser conseguir el mayor confort acústico posible, el elevado número de aulas fuerza a que tengamos que llegar a un buen compromiso entre calidad acústica y presupuesto de la obra. Por ello, en este proyecto se van a proponer distintas soluciones con diferentes relaciones calidad acústica / coste económico.

Por otra parte, debido a la existencia de dos tipos de aulas (aulas grandes y aulas pequeñas), trataremos de proporcionar, en caso necesario, varias soluciones, no solo para distintas relaciones calidad acústica / coste económico, sino también para cada tipo de aula.

0.2 Organización

El presente texto se ha dividido en siete capítulos bien diferenciados que describiremos brevemente a continuación.

En el Capítulo 1 se hace un amplio repaso de las diferentes teorías acústicas existentes para el diseño de espacios arquitectónicos dedicados a la palabra, así como una explicación de los diferentes criterios acústicos que caracterizan estos recintos.

A continuación, en el Capítulo 2 se proporciona un resumen de la normativa vigente en nuestro territorio referente a recintos para la palabra, como aulas y salas de conferencia. Este capítulo proporcionará una visión objetiva del problema.

En el Capítulo 3 se describen en detalle las características geométricas y acústicas de los dos tipos de aula existentes en la tercera planta del Edificio Sabatini de la UC3M.

En el Capítulo 4 se exponen las diferentes medidas “in situ” que se han llevado a cabo mediante un sistema de mediciones acústica denominado *Symphonie*, estudiando los diferentes resultados obtenidos y detallando el procedimiento seguido en función de la normativa descrita.

El Capítulo 5 se centra en la simulación mediante un software de simulación acústica llamada EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) de las dos aulas mediante la cual conseguiremos obtener las diferentes medidas realizadas “in situ” de manera virtual. Es aquí donde confluyen la parte experimental y la simulación ya que podremos ajustar nuestro modelo a las condiciones acústicas reales y obtener, así, unos resultados que reproduzcan de manera fidedigna la realidad del problema.

En el Capítulo 6 se plantearán posibles mejoras que den como resultado un campo acústico mucho más favorable para la audición y comprensión del mensaje oral, gracias a las cuales, obtendremos un mayor confort acústico en las aulas descritas.

Por último, y como cierre a este proyecto, se extraen conclusiones y se describe brevemente el trabajo futuro en el Capítulo 7.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.0 Introducción

El objetivo de este capítulo es conseguir un buen nivel de conocimientos teóricos necesarios para llevar a cabo el estudio acústico de las aulas abovedadas.

El capítulo se organiza de la siguiente manera. El Apartado 1.1 explica la propagación de la onda acústica en espacios cerrados. El Apartado 1.2 se centra concretamente en la descripción de las teorías acústicas típicamente empleados para el estudio del campo sonoro en recintos. En el Apartado 1.3 describiremos el sistema de fonación humano, que es la fuente emisora de sonido que consideraremos en este proyecto. Por último, el Apartado 1.4 proporciona un conjunto de parámetros que permiten cuantificar las condiciones acústicas en los recintos usados para la palabra, como lo son las aulas.

1.1 Propagación del sonido en recintos cerrados

Los sonidos emitidos dentro de un recinto cerrado, a diferencia de los emitidos en campo libre, llegan a cualquier oyente a través de dos medios: por un lado recibimos parte de la energía de manera directa (como si estuviéramos en campo libre) y, por otro, recibimos la energía que nos llega de forma indirecta procedente de las reflexiones que sufre la onda al incidir sobre las distintas superficies del recinto. Estas dos magnitudes se llaman sonido directo y sonido reflejado respectivamente [1].

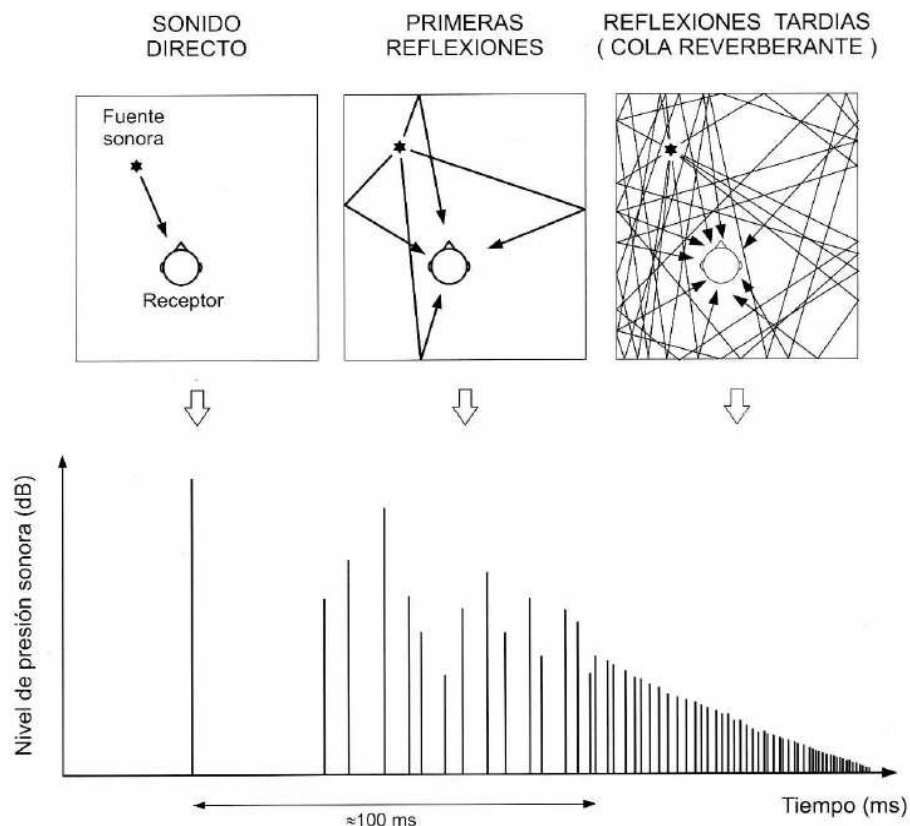


Figura 1 Representación del sonido directo y reflejado (arriba) y ecograma asociado (abajo).

En la Figura 1 [1] podemos observar un diagrama simplificado del sonido directo y reflejado, además de la relación temporal de los mismos (ecograma) cuando el recinto

es excitado con un impulso sonoro. Como vemos, a medida que aumenta el número de reflexiones disminuye la intensidad de la mismas, debido a dos factores: 1) por la ley de la divergencia esférica la intensidad disminuye con la distancia al cuadrado respecto de la fuente (a razón de 6dB/octava); y 2) los choques sucesivos de un rayo con las superficies límite producen una pérdida adicional de energía asociada a la absorción del material.

En el ecograma podemos distinguir tres zonas diferenciadas. La primera de ellas es la que se corresponde con el sonido directo. A continuación, tenemos todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas. Desde un punto de vista temporal se clasificarán como primeras reflexiones todas aquellas que lleguen antes de 100 ms después de la emisión del sonido directo. Estas primeras reflexiones llegan más distantes en el tiempo unas de otras que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden ≤ 3). Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor. Además, al depender directamente de la geometría concreta del recinto, son específicas de cada punto y, por tanto, determinan, junto con el sonido directo, las características acústicas propias del mismo.

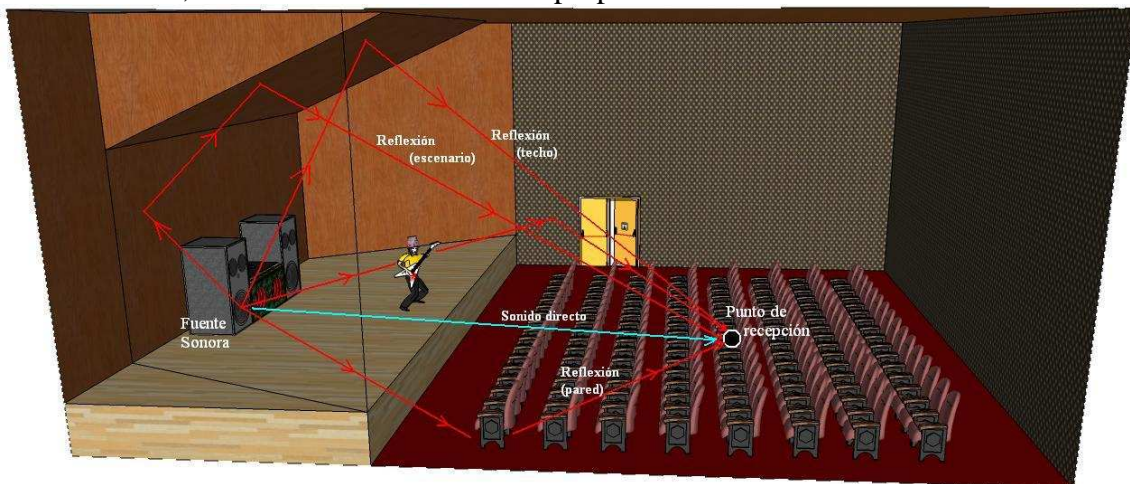


Figura 2 Ejemplo de llegada de las primeras reflexiones a un punto.

En la Figura 2 podemos ver un diagrama simplificado de la llegada de las primeras reflexiones a un punto de escucha determinado desde diferentes puntos de reflexión, por lo que podemos hacernos una idea de la importancia de las mismas.

La última zona corresponde a las reflexiones tardías y recibe el nombre de cola reverberante. Desde un punto de vista acústico, esta zona proporciona información del tamaño “percibido” de la sala.

Con todo esto, podemos decir que, en estado estacionario, el nivel de presión sonora total en cada punto de recepción depende del nivel sonoro que llega por vía directa desde la fuente y del nivel sonoro que producen las múltiples reflexiones del campo reverberado sobre ese punto:

$$L_p(\text{directo}) = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) [dB] \quad (1.1)$$

$$L_p(\text{reverberante}) = L_w + 10 \log \left(\frac{4}{R} \right) [dB] \quad (1.2)$$

donde:

L_w : nivel de potencia de la fuente [dB]¹.

Q : directividad de la fuente.

r : distancia entre la fuente y el receptor [m].

R : constante acústica de la sala² [m²].

Así, el nivel de presión sonora total que genera una fuente puntual en un recinto con campo difuso (véase definición en el apartado 1.2.1) es:

$$L_p(\text{total}) = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) [dB]. \quad (1.3)$$

Otra característica a tener en cuenta en el campo sonoro generado en un recinto cerrado son los modos propios (frecuencias características). El énfasis de alguno de ellos puede producir un cambio en el timbre de la señal básica de la fuente sonora, originando un efecto adverso en la recepción de la señal acústica [2]. Este efecto se lleva a cabo cuando se combina la acción de ondas incidentes y reflejadas y, como consecuencia de ello, se producen interferencias constructivas y destructivas o, lo que es lo mismo, ondas estacionarias o modos propios. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora (SPL, *Sound Pressure Level*) que varía en función del punto considerado. El estudio analítico de los modos propios se realiza mediante la denominada acústica ondulatoria que detallaremos más adelante.

1.2 Teorías acústicas

Cuando emitimos un sonido dentro de un recinto podemos decir que éste juega un papel muy importante en el proceso de radiación y recepción del mismo, teniendo una influencia importante sobre la calidad de la audición. Por tanto, a la hora de estudiar la acústica de un recinto necesitamos unas herramientas que nos permitan caracterizarlos adecuadamente.

¹ $L_w = 10 \log w + 120 [dB]$, siendo w la potencia de la fuente en vatios.

² La constante acústica de una sala, R mide la capacidad del recinto para la absorción del sonido, y puede calcularse como: $R = \frac{\alpha_m \cdot S}{1 - \alpha_m}$, siendo α_m el coeficiente medio de absorción (ecuación (1.6)) y S la superficie total del recinto en m².

Las teorías acústicas nos permiten aproximarnos de manera teórica al problema planteado, y son las siguientes:

- Teoría estadística,
- Teoría geométrica,
- Teoría ondulatoria,
- Teoría psicoacústica.

Viendo esto podemos preguntarnos el porqué de tantos métodos distintos para la resolución de un mismo problema. La razón hay que verla desde una perspectiva histórica, ya que cuando se desarrollaron las diferentes teorías los medios técnicos eran mucho más escasos que en la actualidad y, por tanto, se necesitaba una simplificación del problema para su estudio. De todas, la teoría estadística es la más simple y según avanzamos por cada una de ellas iremos teniendo en cuenta un mayor grado de precisión en la caracterización del campo sonoro de un recinto. Además, es conveniente puntualizar que, a diferencia de las tres primeras teorías (estadística, geométrica y ondulatoria) en las que se tienen en cuenta parámetros objetivos como energía, potencia o absorción sonora, la teoría psicoacústica estudia factores subjetivos y, por tanto, diferentes según el tipo de oyente [3]. Hay que tener en cuenta que, dado que cada persona escucha diferente, la acústica no es un campo de estudio totalmente cerrado y exacto en el que podemos aplicar conceptos teóricos al pie de la letra y deberemos tener en cuenta tanto parámetros objetivos como subjetivos a la hora de realizar un estudio acústico.

1.2.1 Teoría estadística

Es esta teoría la que, normalmente, primero se usa para un estudio del campo sonoro dado que nos permite, de una manera sencilla, estudiar los procesos acústicos y obtener un modelo matemático de los mismos. Pero para ello, necesitamos hacer una serie de simplificaciones previas que darán validez al uso de la estadística matemática:

- 1) La llegada de las ondas reflejadas a cada punto del recinto desde diferentes direcciones deberá ser equiprobable.
- 2) La energía sonora en cualquier punto del recinto es la suma de los valores medios de la energía de todas las reflexiones que pasan por ese punto, por lo que deberá haber igual probabilidad de todos los posibles desfases para todas las ondas que se han sumado.
- 3) El recinto deberá tener unas dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda, y sus superficies tener capacidades de absorción muy parecidas.
- 4) La densidad de energía sonora en un instante de tiempo es la misma en cualquier punto del recinto [2].

Con estas consideraciones conseguimos asegurar una distribución de energía sonora igual en todas las zonas del recinto. En resumen, lo que buscamos con todo esto es conseguir un campo sonoro difuso.

En definitiva, la condición de campo sonoro difuso equivale a suponer que en la sala existe una distribución (cuasi) uniforme del material absorbente en ésta, y que sus dimensiones son mayores que la longitud de onda del sonido [9].

I - Coeficiente de absorción medio

En líneas generales, el coeficiente de absorción es una magnitud que nos da una idea de la cantidad de energía absorbida por un material, pero debemos tener en cuenta que las reflexiones que se produzcan en cada una de las superficies pueden tener un ángulo de incidencia distinto. Además, las propiedades de absorción de algunos materiales pueden depender de este ángulo, por lo que, realmente, no podremos definir la capacidad de absorción como una constante, si no que tendrá que ser el promedio de los valores encontrados para ondas que inciden desde todos los ángulos.

Si las superficies interiores del recinto están formadas por n unidades físicamente diferentes, pero cuyas áreas son iguales, podemos expresar el valor medido como:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}{n}, \quad (1.4)$$

es decir:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i, \quad (1.5)$$

siendo α_1, α_2 y α_n los coeficientes difusos de absorción sonora para cada unidad. Dado que realmente cada superficie de absorción puede tener una dimensión diferente podemos calcular el coeficiente medio de absorción al valor relativo del área de cada unidad como:

$$\bar{\alpha} = \alpha_1 \frac{S_1}{S} + \alpha_2 \frac{S_2}{S} + \dots + \alpha_n \frac{S_n}{S}, \quad (1.6)$$

o lo que es lo mismo,

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i, \quad (1.7)$$

donde:

S_1, S_2 y S_n : áreas de las diferentes unidades no uniformes.

S : área total de todas las superficies internas del recinto.

Finalmente, la absorción total del recinto podemos definirla como;

$$A_1 = \bar{\alpha} S = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i. [m^2] \quad (1.8)$$

Además, no sólo tendremos que tener en cuenta las superficies del recinto, sino también todos los objetos que están dentro de él. Para encontrar la absorción total de dichos objetos simplemente tendremos que multiplicar la absorción equivalente del mismo por el número total de éstos (entendemos como absorción equivalente, la absorción total de un metro cuadrado de superficie, cuyo coeficiente difuso de absorción sonora es numéricamente igual a la absorción producida por un objeto).

La absorción total de todos los grupos de objetos será:

$$A_2 = \alpha_1 n_1 + \alpha_2 n_2 + \dots + \alpha_k n_k, [m^2] \quad (1.9)$$

$$A_2 = \sum_{j=1}^m \alpha_j n_j, [m^2] \quad (1.10)$$

donde n_j es el número de objetos del mismo tipo y α_j es la absorción equivalente de cada uno de ellos.

Por tanto, la absorción total de energía sonora en un recinto contando superficies y objetos será:

$$A = A_1 + A_2 = \sum_{i=2}^n \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^m \alpha_j n_j, [m^2] \quad (1.11)$$

y el coeficiente medio de absorción sonora:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_1 + A_2}{S} = \frac{1}{S} \left(\sum_{i=2}^n \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^m \alpha_j n_j \right). \quad (1.12)$$

II – Tiempo de reverberación

Se define tiempo de reverberación normalizado T al tiempo empleado por la energía sonora en un recinto para disminuir 10^{-6} veces su valor original [2], es decir, una disminución en el nivel de energía de 60 dB (véase Figura 3).

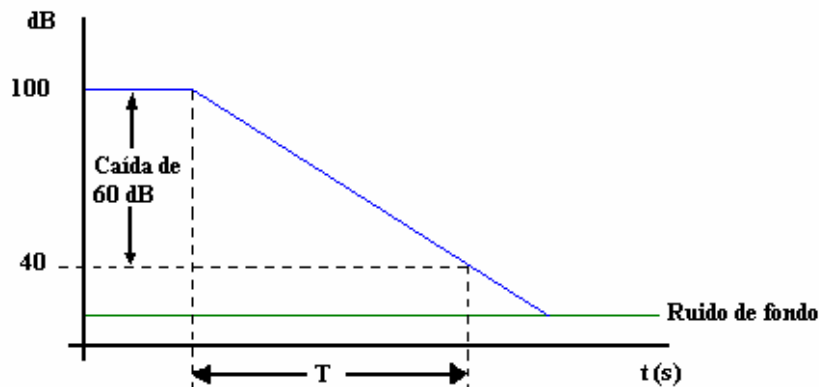


Figura 3 Gráfica del tiempo de reverberación.

Si bien existen infinidad de fórmulas para la estimación del tiempo de reverberación, es la desarrollada por el físico W.C. Sabine en 1896 una de las de mayor uso y aceptación a nivel internacional pese a su sencillez de cálculo:

$$T = \frac{0,161V}{\alpha S} = 0,161 \frac{V}{A}, [s] \quad (1.13)$$

siendo V el volumen de la sala en cuestión.

No obstante, deberemos tener en cuenta que esta fórmula sólo es válida para recintos que tengan un coeficiente de absorción medio menor o igual que 0.2, es decir, recintos reverberantes. Además, éstos, deberán de tener una distribución uniforme del material absorbente.

III – Corrección de Eyring

Con el paso de los años se encontró que la fórmula de Sabine tenía ciertas incongruencias. Según la estimación de Sabine, si el coeficiente medio de absorción es igual a la unidad (reverberación nula), el tiempo de reverberación es distinto de cero, lo cual no tiene sentido físicamente. Por otro lado, si calculamos el coeficiente medio de absorción en función del tiempo de reverberación podrían obtenerse resultados mayores que la unidad, lo cual es imposible.

Teniendo en cuenta estas deficiencias Eyring establece el tiempo de reverberación como:

$$T = 0,161 \frac{V}{S[-\ln(1 - \frac{\sum \alpha_k S_k}{\sum S_k})]} \cdot [s] \quad (1.14)$$

Esta fórmula es más fiable que la de Sabine si el coeficiente medio de absorción es alto, pero presenta la desventaja de que sólo es cierta si el recinto presenta una distribución uniforme del material absorbente. En caso contrario, podemos recurrir al siguiente caso.

IV – Corrección de Millington-Sette

Cuando la variedad de materiales en el recinto es grande y, por tanto, la diferencia entre los diversos valores de los coeficientes de absorción también, podemos recurrir a la aproximación de Millington-Sette, definida de la siguiente forma:

$$T = 0,161 \frac{V}{-\sum S_i \ln(1 - \alpha_i)} \cdot [s] \quad (1.15)$$

Sin embargo, Millington-Sette prosiguieron con la idea de que el campo sonoro establecido fuese difuso, lo que contradice la hipótesis de partida de reparto uniforme de material absorbente. Así, en el fondo, lo establecido por ambos investigadores fue mantener la posibilidad de una no uniformidad de disposición del material absorbente dentro de una casi uniformidad que implica la existencia de campo sonoro difuso [9]. A pesar de este trabalenguas en la suposición de la condición de partida, la expresión (1.15) es una de las aproximaciones de T más utilizadas.

V - Conclusiones

La fórmula de Sabine proporciona buenos resultados para materiales de baja absorción, mientras que la fórmula de Eyring se adecua a todo tipo de absorciones. Por otro lado, podemos decir que, gracias a la fórmula de Millington-Sette, podemos calcular el tiempo de reverberación siempre y cuando los valores de absorción de los distintos materiales sean distintos entre si. Además, no hay que olvidar que estas fórmulas suponen que el campo sonoro es difuso, aunque existen otras aproximaciones que tienen en cuenta la posibilidad de campo sonoro no difuso [9].

Otro aspecto a tener en cuenta es la absorción producida por el aire. Este parámetro tiene sentido en el proceso de decrecimiento del sonido y, por tanto, en el tiempo de reverberación, sólo para alta frecuencia, de 2000 Hz a 4000 Hz, y para volumen grande de la sala ($>5000 \text{ m}^3$). Así, un segundo término en la fórmula de reverberación debe ser introducido como sigue (por ejemplo, para el caso de la aproximación de Millington-Sette):

$$T = 0,161 \frac{V}{-\sum S_i \ln(1 - \alpha_i) + 4mV}, [\text{s}] \quad (1.16)$$

donde m es el coeficiente de atenuación de energía sonora en el aire expresado en m^{-3} .

1.2.2. Teoría geométrica

Como ya hemos visto, la teoría estadística presupone una distribución de energía uniforme en el recinto, caso que en la realidad se produce muy pocas veces, por lo que se hace necesario estudiar el campo sonoro desde otro punto de vista.

Si los materiales absorbentes se distribuyen de manera arbitraria dentro del recinto, algunas superficies reflectantes pueden crear una fuerte onda reflejada dentro del mismo. Cuando estas ondas se suman a otras se puede producir el efecto de una segunda fuente sonora dentro del recinto.

Otro efecto negativo puede producirse por la concentración de sonido debido a la existencia de superficies cóncavas (véase Figura 4), por lo que a veces es necesario estudiar minuciosamente la distribución de los materiales y la geometría del recinto.

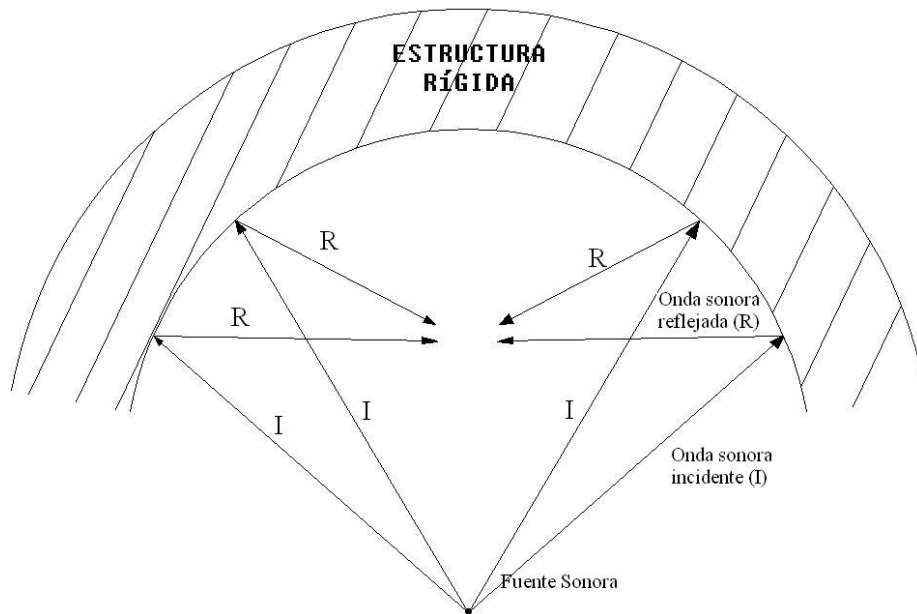


Figura 4 Reflexión de rayos sonoros en superficie cóncava.

Este método de estudio de la acústica de recintos recibe el nombre de teoría geométrica y consiste en la construcción, basándose en las leyes de la óptica (véase Figura 5), de diagramas que indican las trayectorias de los rayos reflejados. No obstante, deberemos tener en cuenta que este método nos proporcionará resultados más exactos cuanto menor sea la longitud de onda sonora con respecto a las dimensiones de las superficies, es decir, conseguiremos un mayor grado de exactitud cuando el estudio del campo sonoro se realice para sonidos de media y alta frecuencia.

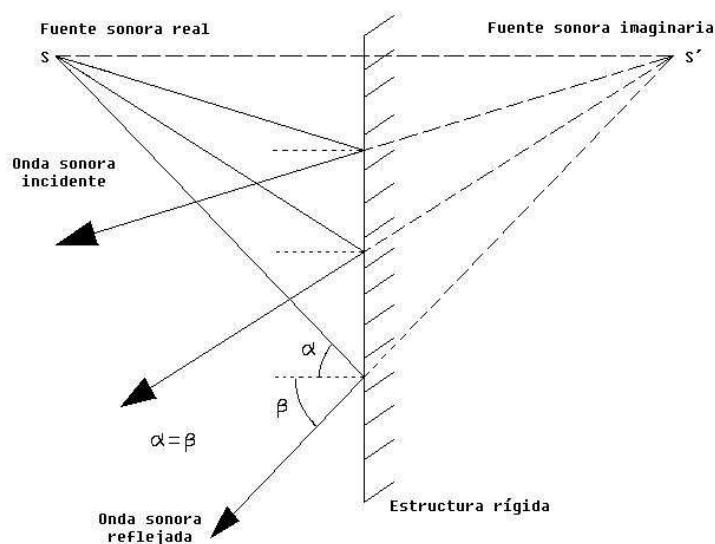


Figura 5 Diagrama de construcción de rayos reflejados y fuente imaginaria.

Además, cabe destacar que el programa de simulación acústica EASE hace uso de esta teoría, por lo que nos ayudará a entender mejor los resultados obtenidos en el Capítulo 5 de este texto.

I – Consideraciones generales

En este caso, y gracias a la analogía con una de las leyes de la óptica, consideramos la onda sonora como un rayo sonoro³ con igual ángulo de incidencia que de reflexión (Figura 5). Además, cada rayo reflejado puede considerarse procedente de un foco imaginario S', simétrico del foco real S, respecto del plano de incidencia. Su intensidad decaerá de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida.

II – Leyes geométricas de propagación

Principio de Fermat

Todas las ondas se desplazan desde el origen por el camino más rápido, no por el más corto. Si la velocidad de propagación del sonido es constante en toda la sala, entonces, el camino más corto y el más rápido son el mismo.

Además, los rayos se propagan en línea recta. De esta forma podemos dividir la potencia total de una fuente en partes que se propaguen a lo largo de distintos rayos en las diferentes direcciones.

Estos rayos, al propagarse, se encuentran con obstáculos, por lo que sufrirán diferentes efectos:

Reflexión

Al chocar la onda con una superficie rígida y ésta “coparticipar” en su movimiento, se producen nuevas ondas que viajan en la misma dirección y sentido contrario que la onda incidente.

Reflexión especular

El rayo incidente, reflejado y la normal a la superficie sobre la que incide, están en el mismo plano y éste es perpendicular a la dirección de choque. El ángulo incidente es igual al existente entre la normal y el reflejado.

Reflexión difusa

La superficie sobre la que incide el rayo no es plana, por lo que, el rayo resultara reflejado hacia diferentes direcciones, dependiendo del ángulo de incidencia del rayo con la superficie.

³ Se entiende por rayo sonoro una pequeña parte de una onda esférica, con abertura despreciable, que se origina en un cierto punto y que además, tiene una dirección de propagación muy definida y sometida a las mismas leyes de propagación que el rayo luminoso, exceptuando la refracción, la transmisión y la curvatura del rayo, al propagarse por un medio no homogéneo, pero si comparten la propagación finita, la cual es responsable de ecos, reverberación...

Difusión

La difusión o *scattering* es la alteración de las direcciones de los rayos de un haz luminoso o acústico/sonoro después de incidir sobre una superficie o de atravesarla. Si la superficie presenta irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda del sonido emitido, se produce una reflexión de la onda incidente en múltiples direcciones. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difusión del sonido.

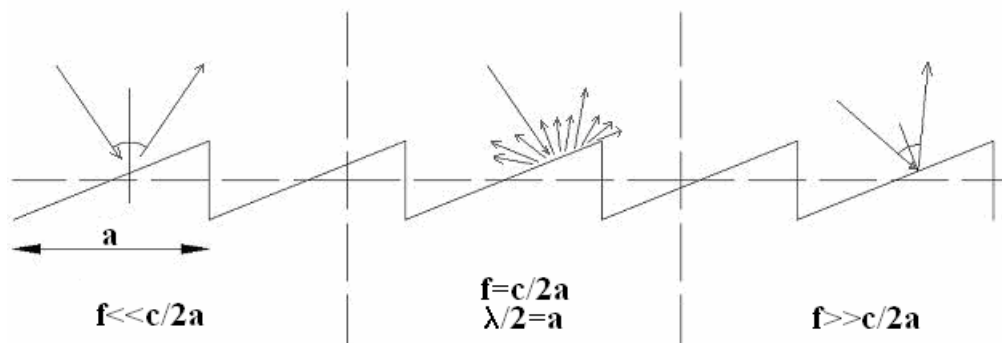


Figura 6 Ejemplo de difusión del sonido en función de la frecuencia.

La Figura 6 muestra las diferentes formas de reflexión sobre una superficie en función de la frecuencia. La difusión se puede cuantificar con el llamado coeficiente de *scattering* “s”⁴, que indica cuán de diferente es una reflexión sobre una superficie de la reflexión especular. El coeficiente de *scattering* toma valores de 0 a 1, donde 0 representa una superficie produciendo una reflexión especular perfecta, mientras que 1 se corresponde con una reflexión totalmente difusa. Todas las superficies generan *scattering*, incluso las que son aparentemente planas donde $s \approx 0.1$.

Difracción

Si el obstáculo es pequeño, habrá parte de la energía que viaje en la misma dirección y sentido contrario que la incidente, y parte que continúe bordeando el obstáculo.

Sombra

Al encontrar un obstáculo grande, el rayo es incapaz de bordearlo, por lo que tras él no existirá sonido. Los límites de esta sombra están determinados por rayos tangenciales que, partiendo de la fuente, alcanzan la periferia del obstáculo.

Refracción

La dirección de propagación de un rayo cambia al pasar a través de una región ocupada por dos medios de distintas velocidades de propagación. En interiores es raro que se produzca, y se suele dar por grandes cambios de temperatura producidos, normalmente, por columnas de aire caliente por las cuales el sonido viaja más rápidamente. Un oyente que esté detrás de una de ellas percibirá el sonido como si procediese de una fuente más alejada de lo que realmente está y con una intensidad

⁴ Una metodología para medir este coeficiente puede encontrarse en la norma ISO 17497-1:2004.

menor. Por esto, los sistemas de acondicionamiento de temperatura no deben colocarse entre la fuente y el oyente. El viento también puede producir este efecto, pero este caso no interesa demasiado dado que, la sala está completamente cerrada.

III - Fuentes de onda incidente: fuentes imagen

Lo que pretendemos conseguir mediante la representación de las fuentes imagen es conocer el número de frentes de onda que alcanzarán la posición de un oyente situado en el punto “P” (Figura 7) estando situada la fuente en el punto “S”.

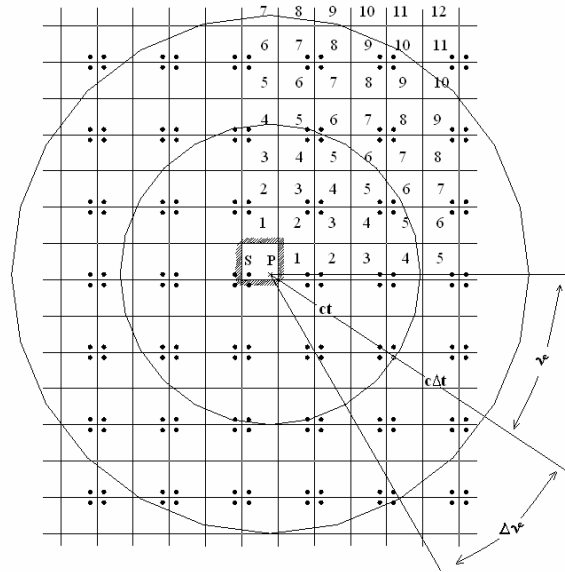


Figura 7 Diagrama de aula rectangular con todas las fuentes imagen.

Como vemos en la Figura 7, las fuentes imagen se sitúan en “habitaciones adyacentes” a la principal, la cual se sitúa en el centro de la imagen. Para saber el número de frentes de onda (Δn) que alcanzarán a “P” en un intervalo Δt , simplemente deberemos saber que coinciden con los procedentes de las fuentes imagen contenidos entre las dos circunferencias con centro “P” y radio “ ct ” y “ $c(t+\Delta t)$ ”, y lo calcularemos como:

$$\Delta n = 2\pi c^2 \frac{t\Delta t}{L_1 L_2}, \quad (1.17)$$

siendo L_1 y L_2 las dimensiones de la sección de perfil o en planta de la sala.

Además, si queremos determinar dentro de ese margen de tiempos, el número de reflexiones que alcanzan al oyente provenientes de una dirección determinada, podremos hacerlo con la siguiente ecuación:

$$\Delta(\Delta n) = \Delta n \frac{\Delta \Phi}{2\pi} = \frac{(c\Delta t)(ct\Delta t)}{L_1 L_2}, \quad (1.18)$$

donde:

$\Delta\Phi$: conjunto de direcciones de las que se quiere averiguar el número de frentes de onda.

Δt : intervalo temporal durante el cual se contabilizan los frentes de onda incidentes.

Como vemos en la ecuación (1.18), desaparece Φ debido a que, una vez que t se hace suficientemente grande, nos da igual la dirección de llegada ya que todas se comportan del mismo modo, es decir, pertenecen al mismo frente de onda [3].

Cabe destacar que estas expresiones consideran el caso bidimensional, es decir, se refieren a rayos que viajan a lo largo de un plano. Para el caso tridimensional el lector puede acudir a la referencia [2].

IV. Reflexiones en superficies curvas

Como ya hemos mencionado anteriormente, este tipo de superficies puede provocar focalizaciones del sonido con el consiguiente malestar que esto puede producir en la escucha de los oyentes.

Gracias a la teoría geométrica podemos realizar diagramas a escala que nos permitirán calcular la longitud y dirección de propagación de los rayos directos y reflejados. Esto nos permitirá realizar un buen diseño de las superficies límite del recinto con el objetivo de conseguir la mejor distribución de los rayos sonoros.

Podemos ver en la Figura 8a) el caso de una bóveda con un radio de curvatura aproximadamente igual a su altura, por lo que se produce una concentración de rayos reflejados, en la región donde están situados los oyentes (zona oscura del suelo), afectando negativamente a las condiciones de audición, debido principalmente a la superposición en esa zona de las ondas directas y reflejadas [2].

Por el contrario, si la relación entre la altura y el radio del techo siguiesen la relación descrita por las Figuras 8b) u 8c), podemos ver cómo la distribución de las ondas reflejadas es más uniforme, evitando así estas concentraciones indeseadas.

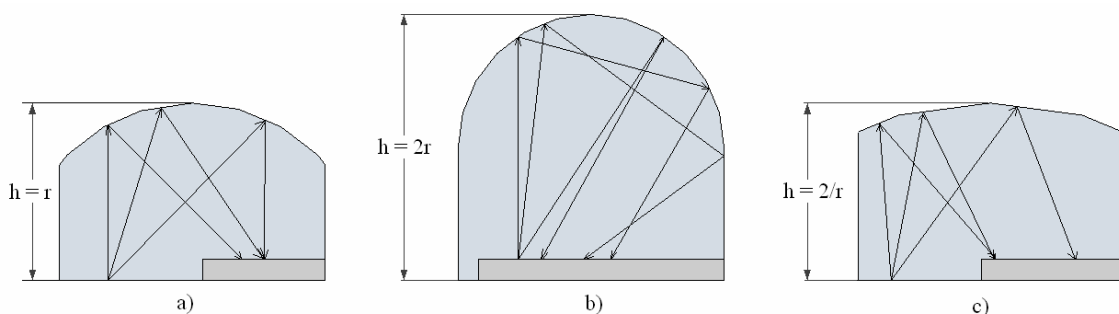


Figura 8 Diagrama de rayos en recintos con techos: a) con radio de la curva r igual a la altura del recinto; b) con $h=2r$ y c) con $h=r/2$.

A parte de los problemas por concentración de sonido, podemos encontrarnos otros, como por ejemplo el eco, que puede producirse debido a la acumulación en un punto del recinto de ondas reflejadas de segundo, tercer, cuarto orden, etc. con un tiempo de retardo superior al mínimo (para una buena inteligibilidad de palabra, 50 ms) y con una intensidad comparable a la de los rayos directos.

En la Figura 9 [4] podemos ver un ejemplo de eco múltiple en el punto E que se produce debido a que la altura del techo es una tercera parte del radio de curvatura del mismo, de modo que este caso también hay que evitarlo.

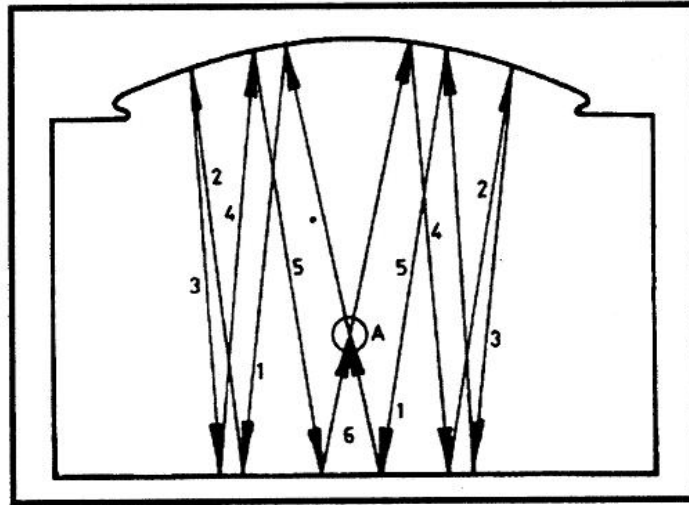


Figura 9 Diagrama de rayos en un recinto con eco múltiple.

1.2.3. Teoría ondulatoria

El estudio del campo sonoro de un recinto puede realizarse no sólo mediante idealizaciones, como en las teorías estadística y geométrica, sino que podemos estudiar directamente la naturaleza ondulatoria del sonido mediante la resolución de la ecuación de onda. Por tanto, este método desvelará la realidad del fenómeno sonoro en un recinto, así como sus características básicas.

I – Consideraciones generales

La idea básica de esta teoría reside en la consideración del volumen de aire en un recinto cerrado como un sistema vibratorio complejo, formado por otros más simples. En el proceso vibratorio generado al emitir una fuente sonora un sonido se originan vibraciones forzadas y modos de vibración. Cuando éstas se amortiguan se llega a una situación estacionaria en el recinto. En este estado, al contrario que en un espacio abierto, las vibraciones pueden expresarse como la suma de un gran número de ondas estacionarias, mientras que, en el momento en que se desconecta la fuente sonora, el sistema pierde el equilibrio, conservando solamente sus modos normales de vibración, los cuales disminuirán gradualmente siguiendo una ley exponencial, que será común para todos los modos normales de vibración.

Por tanto podremos considerar, desde el punto de vista de la teoría ondulatoria, que el volumen de aire en un recinto se comporta como un sistema vibratorio complejo con parámetros distribuidos, que cuando es excitado por un impulso sonoro, genera sus modos propios de vibración, los cuales se van amortiguando gradualmente.

II – Campo sonoro en salas rectangulares

Teniendo en cuenta que la solución de la ecuación de onda es muy complicada para la mayoría de recintos podemos estudiar un caso práctico consistente en una sala paralelepípeda de dimensiones L_x , L_y y L_z en la que las paredes son rígidas y sin absorción.

Sabiendo que la ecuación de onda en el caso general es:

$$\frac{d^2 p}{d^2 x} + \frac{d^2 p}{d^2 y} + \frac{d^2 p}{d^2 z} = \frac{\rho_0}{K} \frac{d^2 p}{d^2 t} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 p}{d^2 t}, \quad (1.19)$$

donde:

p = presión sonora en Pascales.

x, y, z = coordenadas cartesianas de propagación.

ρ_0 = densidad del fluido, en aire $= 1.210^{-3} \text{ g/cm}^3$ a 20°C .

K = valor de rigidez volumétrica o módulo de compresión $= 1,410^{-6} \text{ mbares}$.

En caso de que sólo dependiera de una dirección y de la evolución temporal, la ecuación de onda quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{c^2 d^2 p}{dx^2} = \frac{d^2 p}{dt^2}, \quad (1.20)$$

cuya solución es:

$$p(x, t) = F(ct - x) + G(ct + x), \quad (1.21)$$

donde $-x$ se corresponde a las equis positivas y $+x$ a las equis negativas (sentido del movimiento de la onda), por lo tanto tenemos dos ondas en movimientos opuestos. Además, F y G pueden corresponder con funciones exponenciales imaginarias de la forma:

$$P(x, t) = Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)} \quad (1.22)$$

donde A y B son constantes que podremos determinar a partir de las condiciones de principio y fin.

Como ya se ha dicho, si consideramos un recinto paralelepípedo con paredes completamente rígidas, sin absorción y con las dimensiones descritas más arriba podremos obtener la solución de la ecuación de onda partiendo de las siguientes condiciones de contorno:

$V_x=0$ en $x=0$ y en $x=L_x$

$V_y=0$ en $y=0$ y en $y=L_y$

$V_z=0$ en $z=0$ y en $z=L_z$

Z = Impedancia de las paredes infinitas (recinto sin amortiguamiento)

donde V_i es la velocidad vibratoria en la dirección i . Además, como se desprecia la disipación se cumplirá la ecuación de Helmholtz:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0, \quad (1.23)$$

y, suponiendo que la dependencia temporal de p es armónica, podremos sustituir $\frac{d^2 p}{dt^2}$ por $\frac{d^2(e^{j\omega t})}{dt^2}$ y el valor del número de onda k sustituirlo por $k=\omega/c$ por lo que la ecuación nos queda:

$$\frac{d^2 p}{d^2 x} + \frac{d^2 p}{d^2 y} + \frac{d^2 p}{d^2 z} + k^2 p = 0 \quad (1.24)$$

Expresando la ecuación anterior como funciones independientes para cada una de las dimensiones:

$$p(x, y, z) = p_x\left(\frac{x}{l_x}\right)p_y\left(\frac{y}{l_y}\right)p_z\left(\frac{z}{l_z}\right). \quad (1.25)$$

Se puede sustituir el valor de k por: $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$, es decir, se puede expresar el número de onda como una suma cuadrática de los números de onda de la onda en cada una de las direcciones de coordenadas existentes. Así, sustituyendo en la ecuación (1.24) se obtiene:

$$\left(\frac{d^2 p}{d^2 x} + k_x^2\right) + \left(\frac{d^2 p}{d^2 y} + k_y^2\right) + \left(\frac{d^2 p}{d^2 z} + k_z^2\right) = 0, \quad (1.26)$$

obteniendo de este modo, una solución general en tres factores, cada uno de ellos dependiente de una coordenada.

Para poder expresar la solución de la ecuación de onda como $p(x, y, z) = p_1(x)p_2(y)p_3(z)$ se debe cumplir que $\left(\frac{d^2 p_1}{d^2 x} + k_x^2 p_1\right) = 0$, y lo mismo para $p_2(y)$ y $p_3(z)$, además de las condiciones de los límites: $\left(\frac{dp_1}{dx}\right) = 0$, para $x=0$ y $x=L_x$. Por ello, la solución queda:

$$p_1(x) = A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x) \quad (1.27)$$

donde A_1 y B_1 son constantes que se obtienen de las soluciones frontera. Sabiendo que:

$$\frac{dp_1}{dx} = -A_1 \sin(k_x x) + B_1 \cos(k_x x), \text{ donde para}$$

$$1) \quad x=0 \rightarrow \frac{dp_1}{dx} = 0 \rightarrow 0 = B_1, \text{ y para}$$

2) $x=L_x \rightarrow \frac{dp_1}{dx}=0 \rightarrow 0 = -A_1 \sin(k_x x)$, donde el valor de A es no nulo, entonces:

$$k_x L_x = n_x \pi \rightarrow k_x = \frac{n_x \pi}{L_x} \text{ siendo, } n_x = 0, 1, 2, \dots$$

Por tanto, para que se cumplan las condiciones de los límites $x=0$ y $x=L_x$:

$$p_1(x) = A_1 \cos\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right). \quad (1.28)$$

Por lo que finalmente, sabiendo que lo mismo ocurre para k_y , k_z , $p_2(y)$ y $p_3(y)$, el valor de k será:

$$k^2 = \left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{l_z}\right)^2 \quad (1.29)$$

En este supuesto, y considerando que una fuente situada en una de las esquinas del recinto está radiando, la energía suministrada por ésta puede considerarse soportada por el campo de ondas estacionarias originadas en el recinto. A consecuencia de esto, se forman ondas en dicho recinto que se propagan en diversas direcciones. Aquellas que se propagan paralelamente a los ejes X, Y, Z (coincidentes con las coordenadas x, y, z) y que se han formado como resultado de las reflexiones entre dos superficies, reciben el nombre de ondas axiales. Por otro lado, las que se distribuyen paralelamente a un par de superficies y que se forman como resultado de la reflexión entre cuatro superficies, son llamadas ondas tangenciales. Por último, existen ondas que se forman por la reflexión en todas las superficies y que reciben el nombre de ondas oblicuas (Figura 10 [4]).

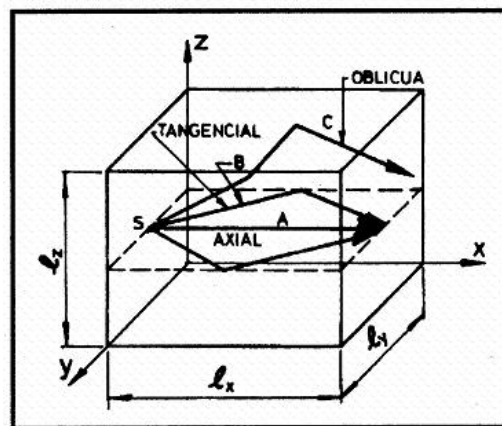


Figura 10 Distribución de ondas axiales, tangenciales y oblicuas.

III – Modos propios

Llamamos modo propio a cada solución, aplicando las condiciones límite, de la ecuación de onda. Los modos propios dependen del número de onda k , y por tanto de la frecuencia, dando lugar a un perfil de presión con una distribución de máximos y mínimos específica. Concretamente, para un recinto rectangular sin amortiguamiento, la onda estacionaria asociada a un modo propio es:

$$p_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = C \cos\left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi}{l_z}\right), \quad (1.30)$$

donde C es una constante arbitraria cuyo valor es $C=A_1 A_2 A_3$.

Este efecto es debido a la aparición de ondas estacionarias que surgen por las interferencias constructivas y destructivas producidas por la combinación de ondas incidentes y reflejadas en el interior de la sala. El número de modos propios es ilimitado, aumentando su densidad con la frecuencia.

La presencia de todos ellos confiere una sonoridad especial a cada recinto dado que se producen concentraciones de energía alrededor de las diversas frecuencias propias. Este efecto es llamado “coloración” y se pone de manifiesto en recintos con dimensiones pequeñas, como por ejemplo un estudio de grabación.

Las frecuencias propias asociadas a cada uno de los diferentes modos propios dependen de las dimensiones y geometría de la sala en estudio y, como ya se ha dicho, resulta muy complicado su cálculo salvo para recintos con forma paralelepípeda y paredes totalmente rígidas. En este caso podremos calcularlas mediante la ecuación de Rayleigh:

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}, \quad (1.31)$$

donde;

k, m, n pueden tomar cualquier valor entero (0, 1, 2, 3,...).

Cada combinación de valores k, m, n da lugar a una frecuencia y modo propio asociado, que recibe el nombre de modo propio k, m, n . Por ejemplo, la combinación $k = 2, m = 1, n = 1$, da lugar al modo propio (2, 1, 1).

Como la aparición de modos propios es un efecto inevitable deberemos escoger correctamente tanto la geometría de la sala como sus medidas para que, una vez combinados los modos, se distribuyan lo más uniformemente posible en el espacio para dar lugar a un nivel de presión sonora suficientemente difuso, al mismo tiempo que se eviten concentraciones en bandas estrechas de frecuencia (coloración en frecuencia).

En la Figura 11 [1] vemos una zona sombreada que representa un conjunto de relaciones recomendadas entre el ancho y el largo de una sala (suponiendo altura de valor 1) con las cuales se obtendrá una distribución uniforme de sus frecuencias propias.

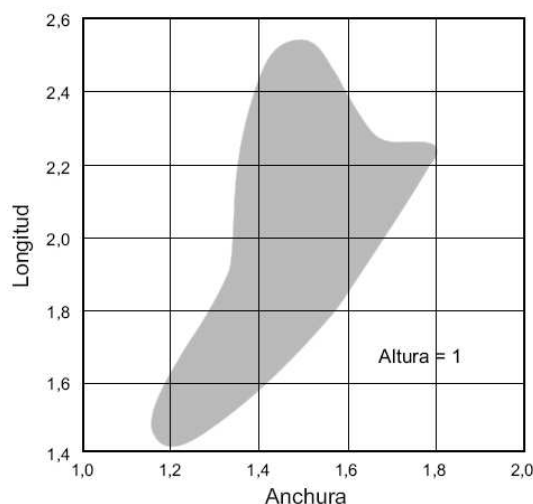


Figura 11 Relaciones recomendadas entre las dimensiones de una sala rectangular para obtener una distribución uniforme de sus frecuencias propias.

Por otro lado, cabe destacar, teniendo en cuenta que la densidad de modos propios aumenta con la frecuencia, que tendremos una frecuencia a partir de la cual el concepto de coloración del sonido debido a la actuación de los modos propios deja de tener sentido debido a que una gran cantidad de modos propios es equivalente a la ausencia de los mismos, por el hecho de que dejan de existir concentraciones discretas de energía. Es decir, al tener un gran número de modos propios cercanos en frecuencia, ninguno de ellos destacará por encima del resto, por lo que su influencia negativa se hará menos evidente.

La fórmula que nos permite calcular la frecuencia máxima a partir de la cual los modos propios dejan de tener una influencia negativa en la respuesta en frecuencia de la sala es la siguiente [1]:

$$f_{\max} = 1849 \sqrt{\frac{T_{\text{mid}}}{V}}, \quad (1.32)$$

donde:

T_{mid} : tiempo de reverberación obtenido como promedio de los valores correspondientes a las bandas de octava centradas en 500 Hz y 1 kHz, expresado en segundos.

1.2.4. Teoría psicoacústica

Es esta teoría la encargada de examinar y modelar las características de la audición humana que permiten localizar e identificar la fuente de un sonido percibido. Por este motivo, podemos comprobar que estamos trabajando con conceptos totalmente subjetivos debido a que los gustos, e incluso la propia audición, pueden ser diferentes para cada persona.

I – Consideraciones generales

Como bien hemos dicho, este campo estudia fenómenos totalmente subjetivos por lo que la forma de cuantificarlos será mediante términos estadísticos, como porcentajes, valores medios o dispersión, entre otros, de personas que perciben lo mismo ante un suceso concreto.

Lo primero que cabría destacar es la diferencia entre sonido y audición. El primer concepto se refiere exclusivamente al fenómeno derivado de la emisión de ondas mecánicas en un medio elástico y con masa, que se producen y se propagan. En cambio la audición se refiere a la percepción que el oído humano hace de los sonidos descritos anteriormente, es decir, es la excitación en el cerebro que se produce al captar cualquier sonido. Por tanto, este concepto será totalmente subjetivo y dependiente del oído que lo reciba, mientras que el primero podrá darnos valores totalmente objetivos.



Figura 12 Anatomía del oído.

II – Anatomía del oído

Cada uno de nuestros oídos trabaja independientemente, de forma que captan la señal sonora y posteriormente es el cerebro quien interpreta el sonido que percibimos. A continuación se exponen las diferentes partes del oído y las funciones que realizan cada una de ellas (véase Figura 12 [9]):

- *Oído externo*: capta la señal sonora y actúa como un resonador a 3 kHz.
- *Oído medio*: bien amplifica la señal, o bien la atenúa si se trata de excitaciones fuertes. Además, actúa como adaptador de impedancias, ya que la señal pasa del aire al líquido linfático.
- *Oído interno*: transducción de información cinética (presión) en impulsos nerviosos (electroquímica).

III – Funcionamiento del oído

La banda de frecuencias audibles para una persona joven con una audición normal se sitúa entre los 20 Hz. y los 20000 Hz. Ahora bien, cabe destacar que la sensibilidad no es la misma para todo el margen de frecuencias y así, podemos ver que en la Figura 13 [1], para valores bajos de frecuencia, necesitamos niveles más altos de

presión sonora para percibir la misma sonoridad que a frecuencias medias. Por ejemplo, un nivel SPL = 70 dB, a 20 Hz, produce la misma sonoridad que un nivel SPL = 5 dB, a 1 kHz.

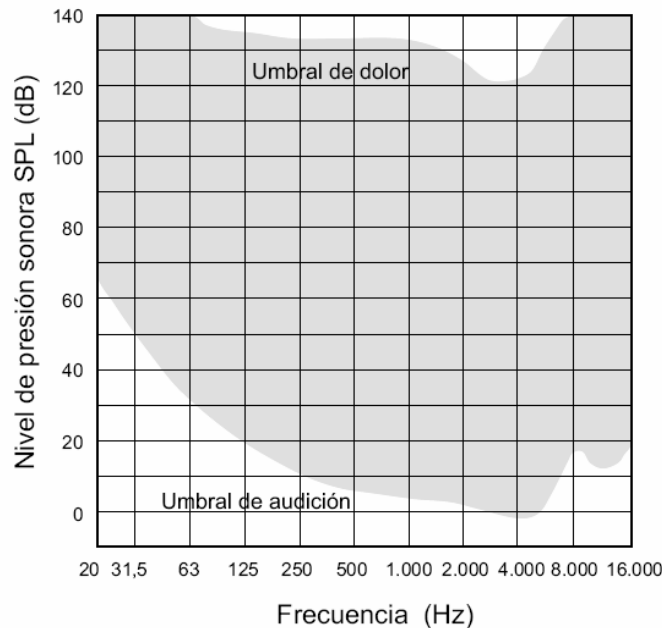


Figura 13 Niveles audibles en función de la frecuencia.

La forma de codificar el nivel de presión sonora del nervio auditivo hace que los límites de audición sean de amplitud. El nivel superior se denomina umbral de dolor y el nivel inferior es el umbral de audición.

IV - Sonoridad

El oído humano no tiene igual sensibilidad en todo el margen de frecuencias, por lo que se hace necesario obtener una magnitud que nos proporcione un valor representativo de este fenómeno. Este valor es el nivel de sonoridad L_n y representa el nivel de un tono puro a una frecuencia cualquiera, el cual tiene tanta sonoridad como un tono de 1 kHz a 40 dB, 80 dB y 120 dB. Es decir, es el nivel de intensidad que tiene que tener un tono, distinto de 1 kHz, para que el oyente lo perciba a la misma intensidad sonora que el tono de 1 kHz.

Por tanto, vemos que no es una magnitud absoluta, sino la comparación de un sonido con otro estandarizado.

Para medir el nivel de sonoridad se usan los fonos:

$$L_n = L_p(1\text{kHz} / \text{dB}) \cdot [\text{Fonos}] \quad (1.33)$$

Un fono es la sonoridad de un sonido sinusoidal de 1 kHz con un nivel de presión sonora de 0 dB. Por otro lado, para medir la sonoridad (N) se utiliza el *son* y se define como la sonoridad de un sonido cuyo nivel sonoro son 40 fonos o como el nivel sonoro de un sonido sinusoidal de 1 kHz con un nivel de presión sonora de 40 dB.

$$N = 2^{\frac{\ln(-40)}{10}} \cdot [\text{Sonos}] \quad (1.34)$$

De forma experimental las denominadas curvas isofónicas de igual sonoridad fueron elaboradas por Fletcher-Munson. Como podemos ver en la Figura 14 [1], los mínimos representan los lugares de mayor sensibilidad mientras que los máximos nos muestran los de menor. Por tanto, vemos que a baja frecuencia el oído es muy poco sensible, mientras que en la banda de 1 kHz a 4 kHz tenemos la zona con mayor sensibilidad. Para que la sensación subjetiva sea igual a diferentes frecuencias necesitamos diferente nivel de presión sonora para cada una de ellas.

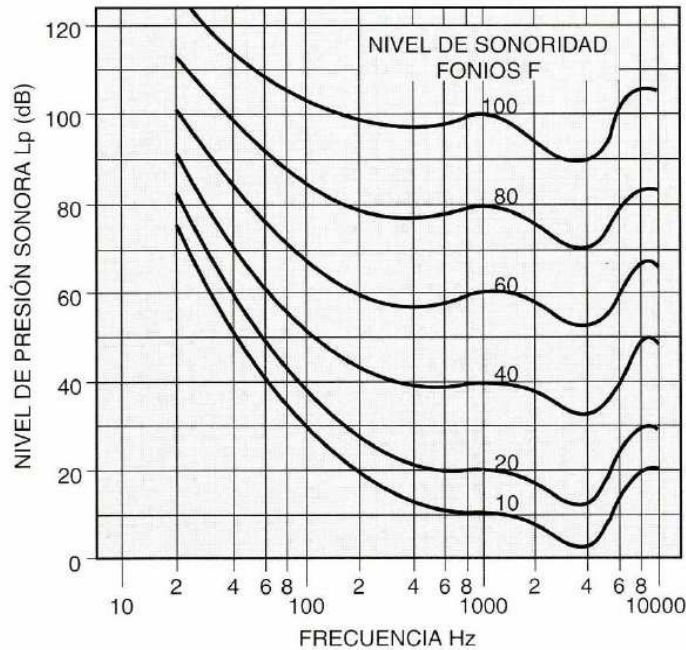


Figura 14 Curvas isofónicas de Fletcher-Munson.

Otro concepto importante que introdujo Fletcher-Munson es el comportamiento del oído como un conjunto de filtros paso banda conectados en paralelo y a cuyo ancho de banda se le denominó ancho de banda crítico. Cuando el ancho de banda de una señal es pequeño la señal se percibe con igual sonoridad, independientemente de lo ancha que sea la banda.

Sin embargo, al superar un determinado ancho de banda (en la mayor parte de los casos un tercio de octava), la sonoridad percibida aumenta a medida que aumenta el ancho de banda (esto ocurre debido a que los nervios acústicos de las regiones filtrantes vecinas también son ligeramente excitados). Por este motivo, se dice que nuestro oído se puede modelar como un receptor de 24 bandas de tercio de octava que van desde 63Hz a 16kHz [7].

Otro fenómeno interesante es que nuestro sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que más bien lo hace de forma logarítmica. Por ejemplo, si la presión de un tono puro de 1 kHz se dobla, la sonoridad, o sensación subjetiva producida por el mismo no llegará a ser el doble. De hecho, para obtener una sonoridad doble, es necesario multiplicar la presión sonora por un factor de 3,16 [1].

Debido a la forma en la que trabaja nuestro oído podemos entender una serie de fenómenos que se producen debido al funcionamiento del mismo.

V – Enmascaramiento del sonido

El enmascaramiento es un efecto que sucede en la percepción de dos o más sonidos producidos simultáneamente o muy próximos en el tiempo, en el que uno de ellos no deja que los demás sean percibidos. Basta que el nivel de la señal enmascarante esté tan solo 6 dB por encima de la enmascarada para que se produzca dicho enmascaramiento [7].

- *Enmascaramiento temporal*: se produce cuando un sonido y otro de mayor intensidad se encuentran próximos en el tiempo. Se puede producir pre o post enmascaramiento, dependiendo de cual llegue antes al receptor.
- *Enmascaramiento frecuencial*: se produce cuando suenan simultáneamente dos tonos cercanos en frecuencia y uno de ellos es más débil que el otro. Se pueden dar dos casos, que sonidos de baja frecuencia enmascaren a sonidos de alta o viceversa, aunque es importante señalar que el enmascaramiento en frecuencia será más efectivo en el primero de los casos.

VI – El eco

En oído integra las reflexiones que le llegan en los primeros 50 ms y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto del sonido directo. Como podemos observar en la Figura 15, esas reflexiones tempranas contribuyen de manera positiva a la comprensión del mensaje oral mejorando la inteligibilidad. En cambio, una reflexión será contraproducente si llega con un nivel elevado después de esos 50 ms. Esto es lo que se denomina eco.

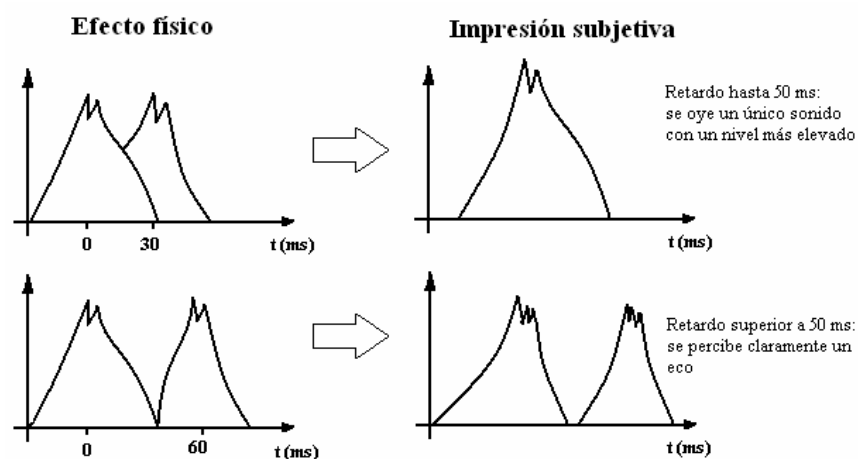


Figura 15 Impresión subjetiva de dos sonidos con diferentes retardos.

Por tanto, podemos ver que hay dos factores fundamentales que influyen en la aparición de ecos: el retardo con el que llega la reflexión al oyente y la diferencia de nivel entre el sonido directo y el reflejado. Las relaciones entre ellos se resumen en la Figura 16 [1].

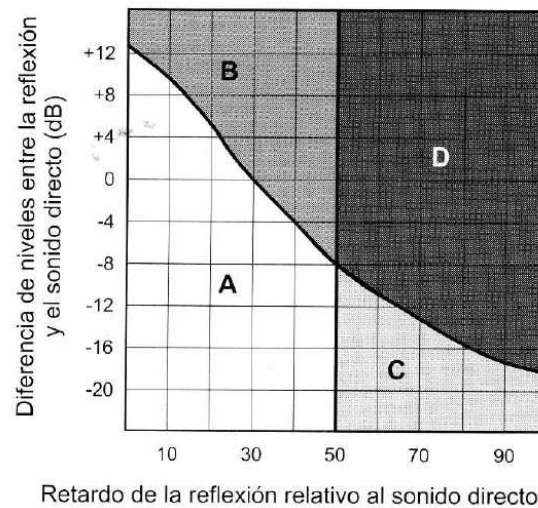


Figura 16 Relación entre el retardo y el nivel de sonido directo-reflejado.

En la zona A, la reflexión llega antes de 50 ms, por tanto si llega con un nivel aceptable, será integrada por el oído, produciéndose un aumento de la inteligibilidad y de la sonoridad. Por el contrario, en la zona B, a pesar de llegar antes de 50 ms, lo hace con un nivel relativo más elevado, por lo que se producirá un desplazamiento de la localización de la fuente sonora hacia la superficie generadora de la reflexión. Por el contrario (zona C), a pesar de llegar después de 50 ms la influencia de la reflexión no será perjudicial debido a que su nivel relativo es bajo. Finalmente, en caso de que dicho nivel sea elevado, como en el caso D, se percibirá eco y, por tanto, tendremos una pérdida en la inteligibilidad de la palabra.

Cabe mencionar que en la figura se considera la posibilidad de que una reflexión pueda presentar un nivel mayor que el de la señal directa, ya que en este contexto una reflexión también se puede entender como un sonido secundario (que llega después del sonido directo) procedente de un altavoz de refuerzo en sistemas de refuerzo sonoro.

1.3 Sistema de fonación humana

La señal de voz es una onda de presión sonora como puede ser la música, el ruido de una máquina o el ladrido de un perro. Sin embargo, la voz es quizá el ejemplo de señal acústica con mayor complejidad, abstracción y cantidad de información que transporta.

Debido a que los recintos que vamos a estudiar son usados exclusivamente para el mensaje oral, será interesante descubrir los aspectos más relevantes del funcionamiento de la señal del habla.

1.3.1. Anatomía de la voz

Desde un punto de vista fisiológico, la señal vocal se produce al expulsar el aire contenido en los pulmones a través de la tráquea y atravesando un sistema formado por varios órganos, cartílagos y músculos. Todo este proceso será controlado por el cerebro que indica a cada uno de estos elementos como debe colocarse para emitir el mensaje deseado.

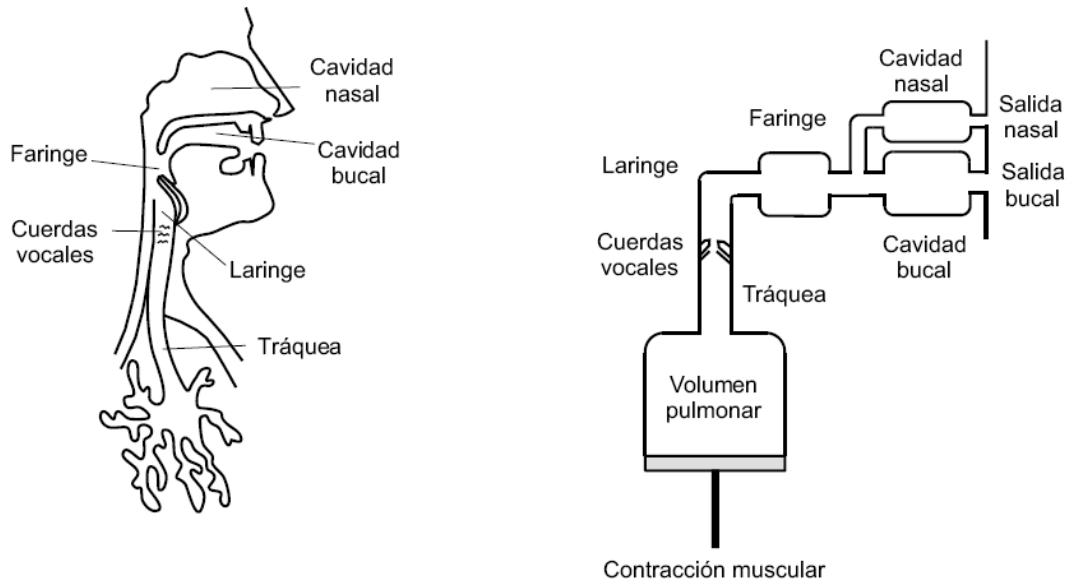


Figura 17 Tracto vocal y representación esquemática del mismo.

Como podemos ver en la Figura 17 [1], el flujo de aire proveniente de los pulmones pasa por la laringe, donde nos encontramos las cuerdas vocales. Éstas se tensan en los sonidos sonoros y por tanto vibran cuando el flujo de aire de los pulmones las atraviesa. En cambio, en los sonidos sordos no habrá ningún tipo de vibración ya que están relajadas y el flujo de aire circula libremente.

A continuación, la señal de voz pasa por el tracto vocal, compuesto por tres cavidades acústicas bien diferenciadas: cavidad faríngea, cavidad oral y cavidad nasal. Todas ellas son las encargadas de dar forma al flujo de aire con el fin de producir un fonema⁵ u otro, dando al espectro de la señal la envolvente determinada. Finalmente, la señal de voz será radiada a través de la boca y los orificios nasales.

1.3.2. Características del mensaje oral

Cuando hablamos el tiempo empleado para emitir vocales (unos 90 ms) es mayor que para las consonantes (20 ms), por este motivo se considera que las vocales constituyen el llamado régimen permanente del habla, mientras que las consonantes se asocian al régimen transitorio. Además, el nivel de presión sonora asociado a las vocales es aproximadamente 12 dB mayor que el correspondiente a las consonantes.

En cuanto a la distribución en frecuencia de los fonemas, las vocales contienen, principalmente, bajas frecuencias, mientras que las consonantes poseen una mayor distribución en alta.

En la Figura 18 [1] están representados, para diferentes niveles de intensidad, los niveles de presión sonora producidos por una persona hablando. Además, podemos ver también la contribución de las diferentes bandas de frecuencia al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra.

⁵ Según la R.A.E. un fonema es: “cada una de las unidades fonológicas mínimas que en el sistema de una lengua pueden oponerse a otras en contraste significativo; p. ej., las consonantes iniciales de *pozo* y *gozo* o de *mata* y *bata*”

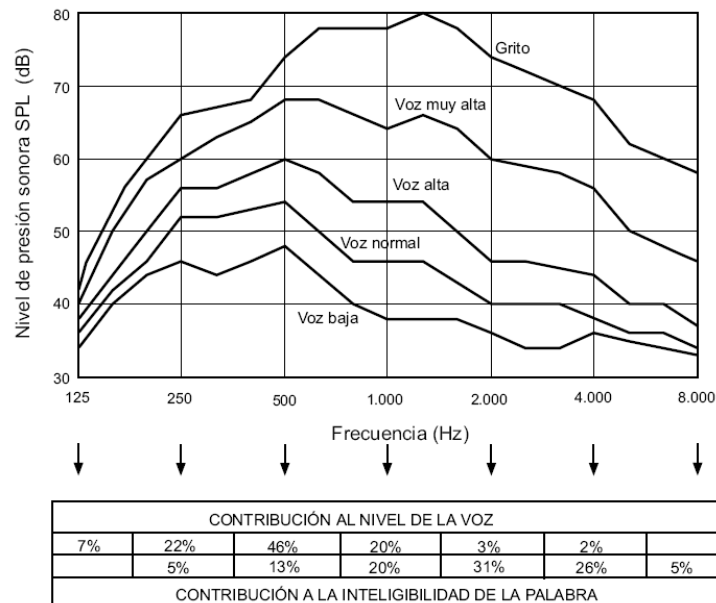


Figura 18 Contribución frecuencial al nivel de la voz y la inteligibilidad de la palabra.

Como podemos ver en la Figura 18 [1], la banda que más contribuye a la señal de la voz se encuentra en torno a los 500 Hz (46%) pero, por el contrario, la máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra se encuentra en frecuencias más altas (57% sumando la contribución en 2 kHz y 4 kHz).

Por tanto, podemos afirmar que la máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra viene dado por las consonantes ya que, como bien se ha dicho, son las que poseen mayor información en altas frecuencias.

1.3.3. Directividad de la voz humana

La directividad es un factor importante cuando tratamos con señales como la voz debido a que, como cualquier otro emisor, tendrá diferente directividad en función de la frecuencia, entre otras cosas, por el funcionamiento del propio sistema de fonación o por la propia forma de la cabeza.

Cabe destacar que en las frecuencias altas es donde más se ve reducida esta radiación, ya que son precisamente éstas las más importantes para la inteligibilidad de la palabra [7].

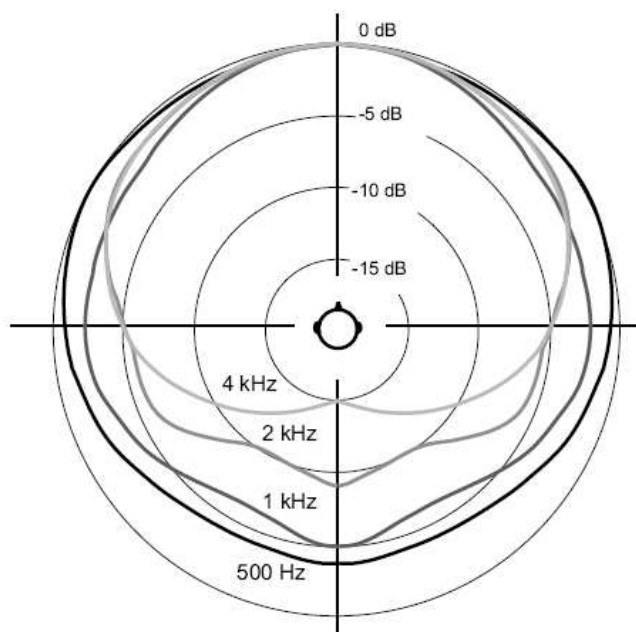


Figura 19 Directividad de la voz humana en las bandas de octava comprendidas entre 500 Hz y 4 kHz (según Moreno y Pfrezschner).

Como vemos en la Figura 19 [1], la directividad aumenta con la frecuencia y es mayor en la dirección frontal, considerándose, a efectos prácticos, un factor $Q=2$. Además, la percepción es menor en la parte posterior del locutor y la diferencia delante-detrás es más notable en la banda de 4kHz por ser la voz más direccional a medida que aumenta la frecuencia.

1.4. Características de salas para la palabra

Los recintos bajo estudio en este texto son aulas, por lo que la fuente acústica principal serán personas hablando. El objetivo de este apartado es proporcionar una serie de parámetros que nos permitan caracterizar de forma fidedigna las cualidades acústicas de las mismas.

1.4.1 Nivel de presión sonora

El campo sonoro, tanto en espacios abiertos como cerrados, se caracteriza normalmente mediante el nivel de presión sonora, el cual se define como 20 veces el logaritmo de la relación entre el valor eficaz de la presión sonora respecto a la presión de referencia.

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{\overline{p^2}}{p_0^2} = 20 \cdot \log \frac{\overline{p}}{p_0} [\text{dB}] \quad (1.35)$$

donde la presión de referencia es $\overline{p_0} = 20 \mu \text{Pa}$ (valor eficaz de la presión umbral de audición a 1kHz) De este modo, todos los sonidos audibles son representados por valores positivos.

Dado que el oído no responde linealmente en frecuencia a los estímulos que recibe, será más conveniente hacer uso de una escala logarítmica para representar la

presión sonora. Además, a menudo se utiliza la curva de ponderación A para compensar las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias dentro del campo auditivo (similar a la curva de sensibilidad del oído humano dada por Fletcher-Munson) y que corrige el nivel de presión sonora según los valores de la Tabla 1.

Banda [Hz]	Corrección [dB]	Banda [Hz]	Corrección [dB]	Banda [Hz]	Corrección [dB]
10	-70,4	160	-13,8	2500	1,3
12,5	-63,4	200	-10,9	3150	1,2
16	-56,7	250	-8,6	4000	1,0
20	-50,5	315	-6,6	5000	0,5
25	-44,7	400	-4,8	6300	-0,1
31,5	-39,4	500	-3,2	8000	-1,1
40	-34,6	630	-1,9	10000	-2,5
50	-30,2	800	-0,8	12500	-4,3
63	-26,2	1000	0,0	16000	-6,6
80	-22,5	1250	0,6	20000	-9,3
100	-19,1	1600	1,0		
125	-16,1	2000	1,2		

Tabla 1 Valores de corrección de la curva de ponderación A en tercios de octava.

1.4.2. Tiempo de reverberación

Como ya se ha mencionado, el tiempo de reverberación a una determinada frecuencia, se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente sonora deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora cae 60dB (véase Figura 20). Cuando el valor del tiempo de reverberación es grande se dice que el recinto es “vivo”. En cambio, si el valor es pequeño, se trata de un recinto “apagado”.

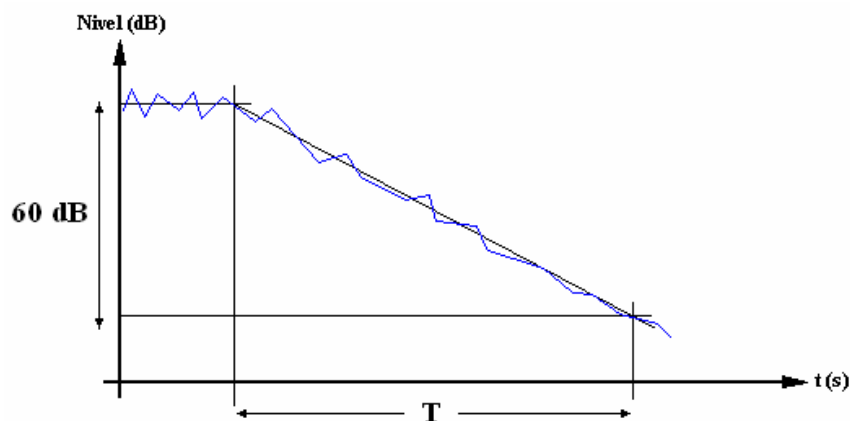


Figura 20 Ejemplo de diagrama de tiempo de reverberación.

Por tanto, podemos decir que tenemos un tiempo de reverberación para cada banda de frecuencias (octavas o tercios de octava) y que éste decae irregularmente dependiendo de la absorción en las diferentes frecuencias de los materiales existentes en el recinto.

Hasta el día de hoy, el tiempo de reverberación ha sido el parámetro más representativo de la acústica de un recinto, de forma que, a pesar de que las medidas se efectúen para cada una de las frecuencias características en tercios de octava, cuando nos encontramos un valor único de tiempo de reverberación para una sala se referirá a aquel que se obtiene de la media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz, representándose como T_{mid} :

$$T_{mid} = \frac{T(500Hz) + T(1kHz)}{2} \quad (1.36)$$

Debido a las particularidades del sonido y los recintos el tiempo de reverberación no es exactamente el mismo en todos los puntos de la sala, aunque, salvo casos muy particulares, se asemeja bastante. Esta homogeneidad favorece la calidad acústica del recinto. Se puede aproximar el valor global del tiempo de reverberación de una sala a través de la aproximación de Sabine, como vimos en la ecuación (1.13).

Además, el valor óptimo del tiempo de reverberación de salas para la palabra puede calcularse de forma empírica, por ejemplo, aplicando las ecuaciones (1.37) y (1.38) o usando la gráfica de la Figura 21 [9].

$$T_{mid \text{ óptimo max}} = 0,368 \cdot V^{0,1505} [s], \quad (1.37)$$

$$T_{mid \text{ óptimo min}} = 0,264 \cdot V^{0,1394} [s]. \quad (1.38)$$

Por otro lado, es conveniente que el tiempo de reverberación de una sala no varíe en función del grado de ocupación de la misma con el fin de que las características acústicas de dicha sala sean lo más independientes posible del número de personas presentes en cada caso. Además, es importante que este tiempo de reverberación se mantenga lo más constante posible con la frecuencia, especialmente a bajas frecuencias, ya que un elevado tiempo de reverberación en este rango de frecuencias producirá un empeoramiento en la inteligibilidad de la palabra.

En la Figura 21 podemos ver también una recomendación del valor de T_{mid} en función del volumen de la sala [10].

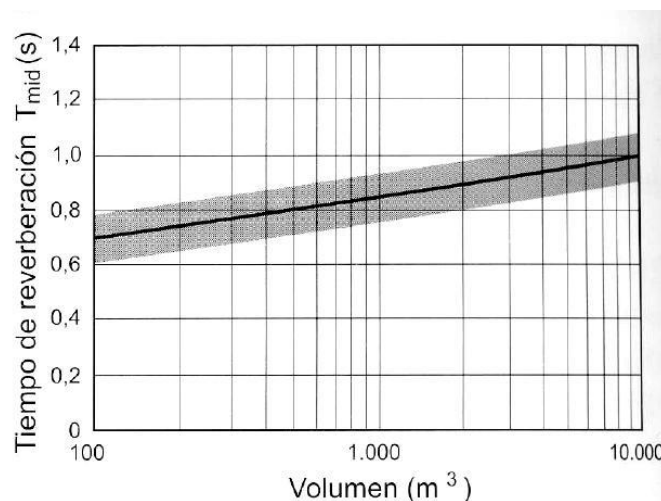


Figura 21 Valores recomendados de T_{mid} en función del volumen del recinto en salas de conferencias/aulas.

1.4.3. Brillo y calidez

El brillo y la calidez son dos parámetros que se obtienen a partir del tiempo de reverberación. Se dice que el sonido es brillante en una sala si hay buena respuesta en alta frecuencia. El brillo Br se obtiene como:

$$Br = \frac{T(2kHz) + T(4kHz)}{T(500Hz) + T(1kHz)} \quad (1.39)$$

Por otra parte, decimos que una sala tiene calidez acústica si hay buena respuesta en baja frecuencia. La calidez acústica BR ("Bass Ratio") se obtiene como:

$$BR = \frac{T(125Hz) + T(250Hz)}{T(500Hz) + T(1kHz)} \quad (1.40)$$

En el primer caso, el valor óptimo del brillo de una sala para el lenguaje debe no ser inferior a 0,8. En el segundo caso, el valor adecuado para la calidez esta entre 0,9 y 1,3, considerándose óptimo el valor de 1,2.

1.4.4. Tiempo de caída inicial (EDT)

El tiempo de caída inicial (EDT, *Early Decay Time*) se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora decae 10 dB. Es decir, sería el tiempo de reverberación de la sala si siguiese el patrón de caída inicial (Figura 22).

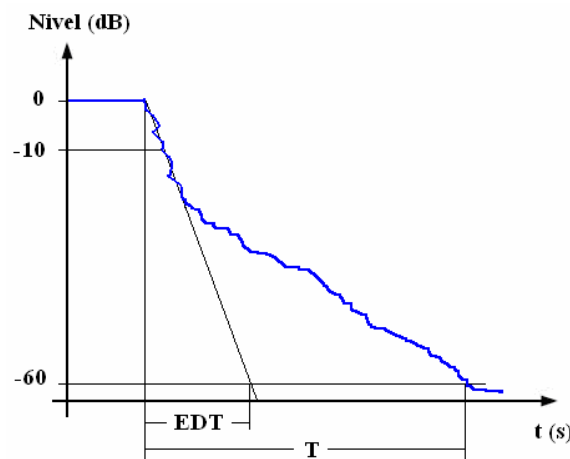


Figura 22 Relación entre EDT y T

Para que exista una perfecta difusión del sonido T y EDT deberán ser iguales. Sin embargo, normalmente, estos dos valores son distintos ya que es difícil conseguir en la práctica un campo sonoro difuso y la curva de caída presentará una doble pendiente más o menos acusada como podemos ver en la Figura 22.

Según el autor Antoni Carrión Isbert [1], el EDT está más relacionado con la sensación subjetiva de viveza que el T , utilizado tradicionalmente. Esto significa que, en todos aquellos puntos de una sala con un EDT significativamente menor que el T , la sala

resultará, desde un punto de vista subjetivo, más apagada de lo que se deduciría del valor de T .

Para conseguir una buena difusión del sonido, es preciso que el valor medio de los EDT correspondientes a las bandas de 500 Hz y un 1 kHz sea del mismo orden que T_{mid} .

1.4.5. Intimidad (ITDG)

La intimidad establece una conexión entre el oyente y la fuente, es decir, permitirá establecer si el oyente se siente inmerso o distante de la actividad hablada.

Mediante el Intervalo Inicial de Retardo (*Initial Time Delay Gap*), que es el tiempo que tarda en llegar la primera reflexión al oyente después del sonido directo, estableceremos cuantitativamente esta relación (véase Figura 23).

Según Beranek [1], el valor recomendado de este parámetro en el centro del recinto (los valores de los puntos cercanos a las paredes son siempre cortos y no resultan útiles) debe ser menor o igual a 20 ms para conseguir un grado de intimidad acústica deseable.

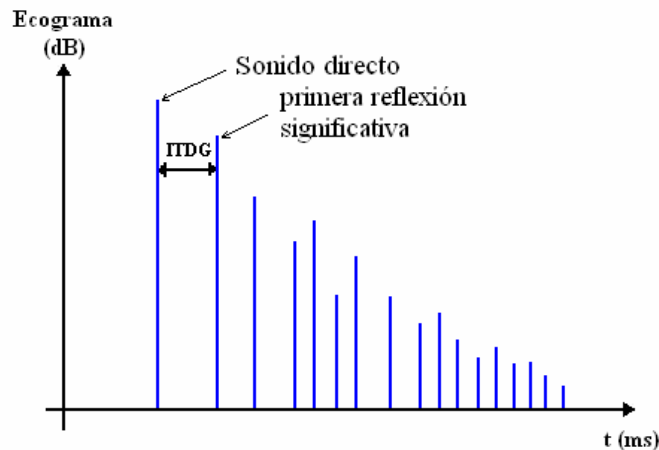


Figura 23 Obtención de ITDG a partir de un ecograma.

1.4.6. Claridad de la voz (C_{50})

La claridad se determina objetivamente a través de la relación en dB de la energía que llega al oyente durante los primeros 50 ms., incluyendo el sonido directo, y la que llega después.

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{\int_{0,05}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{0,05} p^2(t) dt} [dB] \quad , \quad (1.41)$$

siendo $p(t)$ la respuesta al impulso de la sala.

Habitualmente se utiliza el valor medio ponderado denominado “*speech average*” que se calcula de la siguiente manera:

$$C_{50} = 0,15C_{50}(500\text{Hz}) + 0,25C_{50}(1\text{kHz}) + 0,35C_{50}(2\text{kHz}) + 0,25C_{50}(4\text{kHz}). \quad (1.42)$$

El valor recomendado para este parámetro sería cualquier valor superior a 2,5 dB.

1.4.7. Definición (D)

La definición es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo:

$$D = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \cdot 100\% . \quad (1.43)$$

Como podemos observar, existe una estrecha relación entre este parámetro y la claridad de la voz. Concretamente, la relación entre ambos, en una banda de frecuencia cualquiera, es:

$$D = \frac{1}{1 - 10^{-\frac{C_{50}}{10}}} . \quad (1.44)$$

Para evaluar la definición, tomamos el valor medio de la misma medido en las frecuencias de 500Hz y 1kHz. Este valor debería ser superior al 65%, ya que un valor bajo de la definición muestra que la energía sonora reflejada en los primeros 50ms es pequeña en relación con la energía reflejada total y, por tanto, que el recinto es poco íntimo, el tiempo de reverberación excesivo y la sala muy viva.

1.4.8. Pérdida de articulación de consonantes (ALCons%)

A principios de los años 70, el investigador V.M.A. Peutz realizó un estudio gracias al cual estableció una fórmula para el cálculo de la inteligibilidad. En este experimento comprobó estadísticamente que se producían más pérdidas de articulación de vocales que de consonantes. Es decir, que la inteligibilidad de la palabra está íntimamente relacionada con la capacidad de comprender correctamente las consonantes, ya que éstas llevan la mayor parte de la información del mensaje hablado [1], por tanto, sugirió el ALCons% (*Articulation Loss of Consonants*) como medida de la inteligibilidad de las salas.

Este parámetro relaciona el tanto por ciento de consonantes no entendidas correctamente por un oyente en un recinto con reverberación y ruido, con el total de consonantes emitidas. De este modo, cuanto mayor sea el valor del ALCons%, menor será la inteligibilidad de la palabra.

El cálculo de este parámetro se planteó originalmente como:

$$AL_{cons} = 0,9 \frac{p_r^2}{p_d^2} T \quad \%, \quad (1.45)$$

donde p_r^2 es la presión en el campo reverberante y p_d^2 es la presión en el campo directo, obtenidas a partir del instante de tiempo que define la relación energía útil-perjudicial. Además, en un principio, el cálculo se centraba en la banda de frecuencia de los 2000 Hz, ya que es la que más aporta a la inteligibilidad pero hoy en día cabe la posibilidad de analizar adicionalmente en las bandas de 500 Hz y 1000 Hz.

No obstante, este cálculo proporciona resultados muy favorables cuando el tiempo de reverberación es bajo y/o cuando nos encontramos en zonas cercanas al campo directo y, por el contrario, obtenemos peores resultados ante tiempos de reverberación grandes y alejados del campo directo. Por este motivo se desarrollaron los analizadores TEF (tiempo-energía-frecuencia) que intentan compensar los problemas descritos mediante la siguiente formulación:

$$AL_{cons} = 10^{-1,7[(ISN+IT)-(ISN-IT)]}, \quad (1.46)$$

donde se definen la influencia del ruido de fondo y del tiempo de reverberación como:

$$ISN = \log \left[\frac{0,9}{\sqrt{1 + 10 \frac{p_d^2}{p_r^2}}} + 0,1 \right] \quad (1.47)$$

$$IT = \log \left[\frac{0,9}{\sqrt{1 + \frac{50}{T^2}}} + 0,1 \right] \quad (1.48)$$

Existe también, una aproximación mejor derivada de la fórmula original pero que proporciona una mayor correlación entre las curvas propuestas por Peutz y la evaluación subjetiva de oyentes, reflejada en la Fórmula (1.49):

$$AL_{cons} = 10^{-2[(A+B+C)-(A \cdot B \cdot C)]} + 0,015 \quad (1.49)$$

donde los términos A, B y C se corresponden con:

$$A = -0.32 \log \frac{p_r^2 + p_N^2}{10 \cdot p_d^2 + p_r^2 + p_N^2}, \quad B = -0.32 \log \frac{p_N^2}{10 \cdot p_f^2 + p_N^2}, \quad C = -0.51 \log \frac{T}{12},$$

siendo p_N^2 la presión del nivel de ruido enmascarante [12].

Es importante destacar que en función de la formulación empleada los resultados esperados del ALCons% serán diferentes entre sí, por lo que, a la hora de exponer los resultados, habrá que indicar qué método de cálculo se ha usado.

En la Tabla 2 [7] se muestran las calificaciones recomendadas en función de los resultados y del método de cálculo:

Valoración subjetiva	Peutz _(1.45) /TEF _(1.46)	Peutz _(1.49)
Excelente	0% a 3%	0% a 7%
Buena	3% a 7%	7% a 11%
Aceptable	7% a 11%	11% a 15%
Pobre	11% a 15%	15% a 18%
Mala	>15%	>18%

Tabla 2 Valoración subjetiva del ALCons%.

Finalmente, destacar que en la Figura 24 [10] se ven reflejados los experimentos de Peutz y nos sirven, al igual que las fórmulas comentadas, para calcular el ALCons% de una manera más rápida en función del tiempo de reverberación y el ruido de fondo.

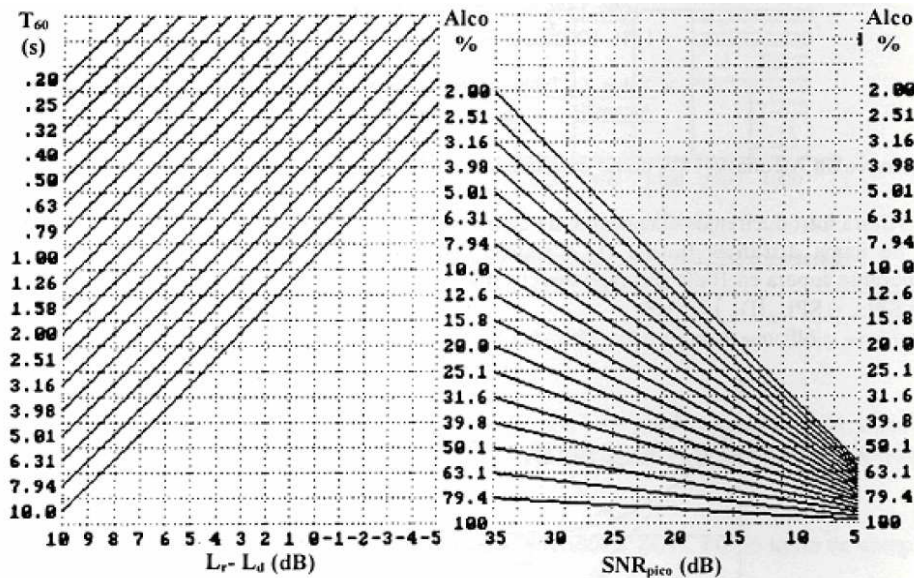


Figura 24 Pérdida de la articulación de consonantes. ALCons%.

En la gráfica de la izquierda podemos ver que el valor del ALCons% (eje ordenadas derecho) se obtiene a partir de los valores del T (eje de ordenadas izquierdo) y la diferencia $L_D - L_R$ (eje de abscisas). Para calcular el valor de $L_D - L_R$ usaremos la siguiente fórmula:

$$L_D - L_R = 10 \log \left(\frac{QR}{r^2} \right) - 17 \quad [dB], \quad (1.50)$$

donde, si recordamos en expresiones anteriores:

Q: factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada ($Q = 2$ en el caso de la voz humana, considerando la dirección frontal del orador).

R: constante de la sala (en m^2).

r: distancia del punto considerado a la fuente sonora (en m).

Otro factor importante a tener en cuenta en la inteligibilidad de la sala es el ruido de fondo. Cuando la relación señal a ruido es menor que 25 dB, el valor del ALCons% se corrige con la gráfica de la derecha.

1.4.9. Índice de transmisión del habla (STI)

El STI (*Speech Transmission Index*), conceptualmente más complejo, evalúa de 0 (inteligibilidad nula) a 1 (inteligibilidad óptima) la inteligibilidad de la palabra partiendo de la propia señal de voz. Este parámetro se basa en el análisis de la degradación que sufre la voz al transmitirse en un recinto, debido a los efectos de la reverberación, los ecos y el ruido. Además, esta degradación está caracterizada por la reducción de los índices de modulación “m” cuyo cálculo podemos ver en el Apéndice 2 de [1].

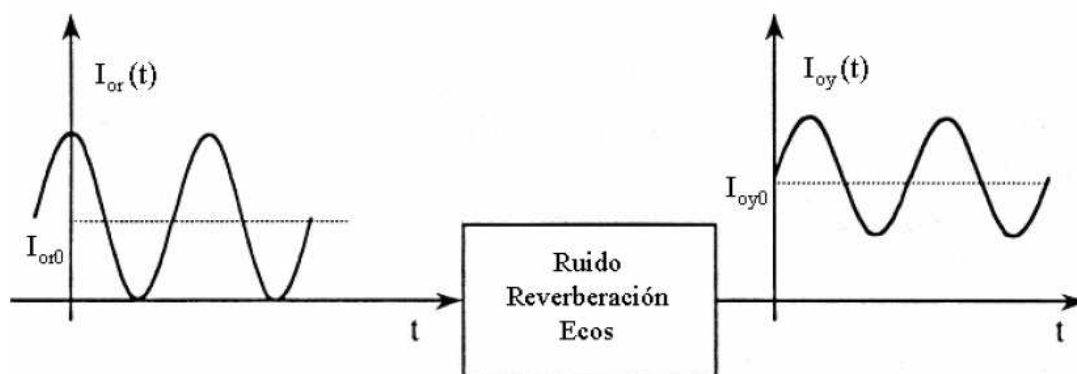


Figura 25 Intensidad de la señal de habla en un recinto en función del tiempo.

En la Figura 25 [7], vemos una representación de la influencia del ruido, la reverberación y el eco en la señal percibida por el oyente (I_{oy0}) con respecto a la señal emitida por el orador (I_{or0}).

Como simplificación del STI surge el índice RASTI (RApid STI) que se calcula a partir de un número menor de valores de “m” y hace que este índice (RASTI) sea el más utilizado en las mediciones de inteligibilidad en recintos, dada su rapidez de cálculo con respecto al STI.

Otro factor a tener en cuenta es que existe una correlación (véase Figura 26 [1]) entre los valores del ALCons% y los del STI/RASTI y que vemos reflejada mediante la fórmula de Farrel-Becker:

$$STI = 0,9482 - 0,1845 \ln (ALCons\%) \quad (1.51)$$

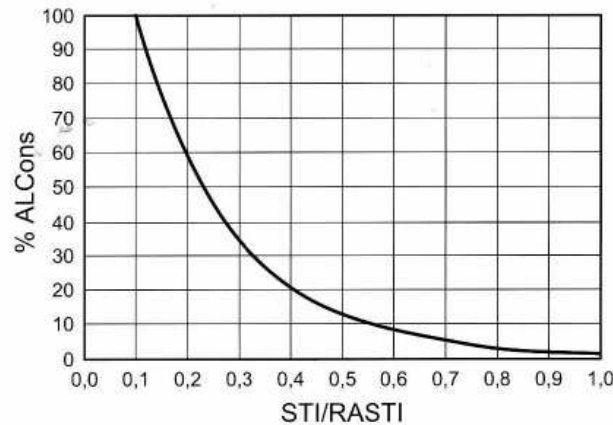


Figura 26 Correlación entre STI/RASTI y ALCons%.

Por tanto, y al igual que con el ALCons%, podemos hacer una valoración subjetiva de la inteligibilidad de palabra mediante el índice STI/RASTI. Dicha valoración se encuentra reflejada en la Tabla 3 [1].

STI/ RASTI	VALORACIÓN
1,00 – 0,88	Excelente
0,86 – 0,66	Buena
0,64 – 0,50	Aceptable
0,49 – 0,36	Pobre
0,34 – 0,24	Mala

Tabla 3 Valoración subjetiva del STI/ RASTI.

1.4.10 Criterio de ruido

El ruido de fondo es todo aquel ruido presente en una sala cuando no se realiza ninguna actividad. Dicho ruido puede provenir del exterior del recinto o tener su origen en los sistemas de climatización y en las instalaciones eléctricas.

El efecto principal del ruido de fondo sobre la palabra será el enmascaramiento, con la consecuente reducción de inteligibilidad. Para estudiar en qué cantidad afecta el ruido a la palabra, debemos tener en cuenta las características espectrales y temporales del ruido.

El método para evaluar objetivamente el grado de molestia que produce un determinado ruido de fondo se basa en comparar los niveles de ruido existentes en la sala, para cada banda de octava comprendida entre 63Hz y 8kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (Noise Criteria). Se trata de un índice proporcionado por L.L. Beranek [1], con el que se relaciona el espectro de un ruido con la alteración que produce en la comunicación verbal, teniendo en cuenta los niveles de interferencia de la palabra y los niveles de sonoridad. Así, las curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia.

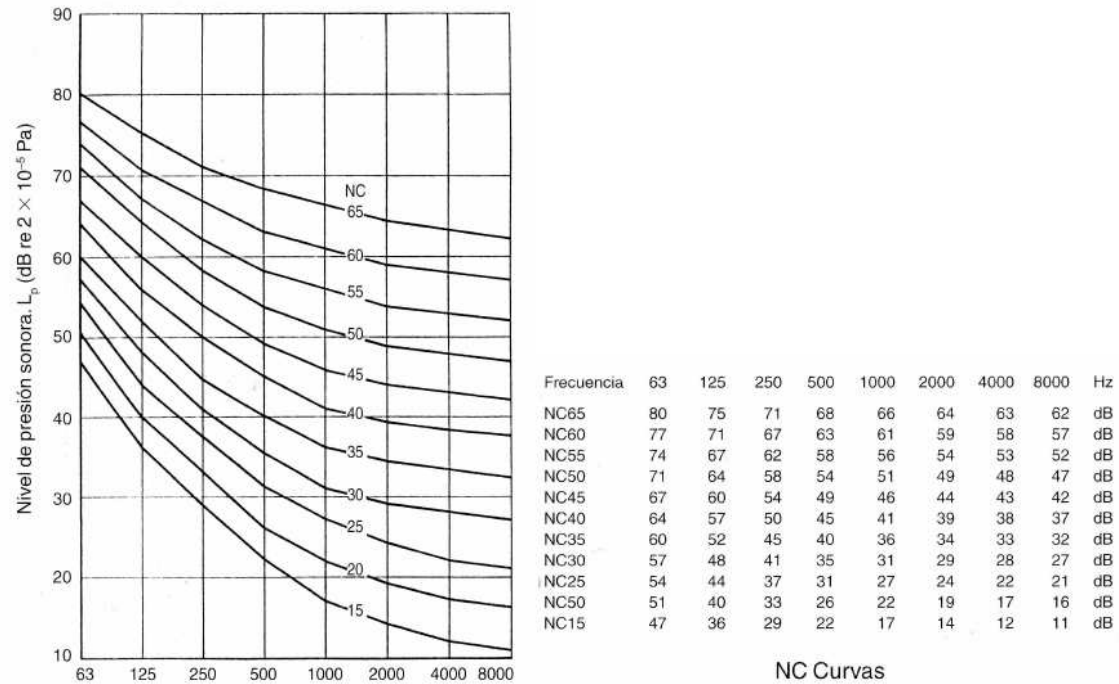


Figura 27 Gráfica y valores de las curvas NC.

Estas curvas, que podemos ver en la Figura 27 [9], se utilizan para determinar el nivel de ruido máximo recomendado dependiendo de la funcionalidad de la sala. Un recinto cumplirá una determinada curva NC si sus niveles de ruido de fondo se encuentran por debajo de la curva NC correspondiente en todas las bandas de octava. El cumplimiento de la especificación NC es el primer paso para conseguir un confort acústico y un grado de inteligibilidad adecuados. Como vemos en la Tabla 4, en el caso de aulas se recomienda que el ruido de fondo se encuentre entre las curvas NC 20 y NC 30.

ESPACIO TIPO	CURVA NC RECOMENDADA
Sala de conferencias/aula	20 – 30
Biblioteca	30 – 35
Restaurante	35 – 40
Cafetería	40 – 45
Polideportivo	40 - 50

Tabla 4 Curvas NC recomendadas para diferentes tipos de recintos.

2. NORMATIVA ESPAÑOLA SOBRE ACÚSTICA EN AULAS

2.0 Introducción

El objetivo de este segundo capítulo es obtener unas directrices iniciales que permitan fijar unos parámetros objetivos para la consecución de una inteligibilidad óptima en las aulas. Además, se proporcionarán, como así lo hace la normativa, dos posibles opciones de diseño de aulas.

2.1 El Documento Básico de Protección frente al ruido

A día de hoy podemos decir que, aunque no sean muy extensas, tenemos unas directrices claras a la hora de construir un edificio dedicado para el mensaje oral. Estas directrices están plasmadas en el Documento Básico DB-HR de Protección frente al ruido que se enmarca dentro del Código Técnico de la Edificación (CTE) [11], el cual, es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley 38/1999 de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE). En este apartado, por tanto, se intentará aportar una visión general sobre los procedimientos y recomendaciones establecidos por el mismo.

No obstante, el DB-HR establece en su Apartado III (Criterios generales de aplicación) que podrán tomarse otras soluciones diferentes a las recomendadas en dicho texto siempre y cuando se siga el procediendo establecido en el Artículo 5 del CTE y se refleje adecuadamente en el proyecto.

Además, es importante destacar que esta norma solamente es aplicable a aulas cuyo volumen sea inferior a 350 m^3 , por lo que en caso de estudiar un aula con un volumen superior, y a falta de legislación local de este tipo, el criterio de diseño será el que establezca el ingeniero.

En el primer apartado del texto se dan tres indicaciones necesarias, en lo referente a la protección frente al ruido, para el cumplimiento de las exigencias del CTE:

1. Alcanzarse los valores límite de aislamiento acústico a ruido aéreo y no superar los valores límite de nivel de presión de ruido de impactos (aislamiento acústico a ruido de impactos) que se establecen en el apartado 2.1 del DB-HR.
2. No superar los valores límite de tiempo de reverberación que se establecen en el apartado 2.2;
3. Cumplir las especificaciones del apartado 2.3 referentes al ruido y a las vibraciones de las instalaciones.

Uno de los parámetros de interés dentro del DB-HR es el aislamiento acústico a ruido aéreo. Este parámetro mide la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en dBA, entre el recinto emisor y el receptor y es responsable, entre otros, del nivel del ruido de fondo dentro del recinto.

El DB-HR nos proporciona (Tabla 5 [11]) los valores recomendados de aislamiento a ruido aéreo $D_{2m, nT, Atr}$, en dBA, entre un recinto protegido y el exterior.

L_d dBA	Uso del edificio			
	Residencial y hospitalario		Cultural, sanitario ⁽¹⁾ , docente y administrativo	
	Dormitorios	Estancias	Estancias	Aulas
$L_d \leq 60$	30	30	30	30
$60 < L_d \leq 65$	32	30	32	30
$65 < L_d \leq 70$	37	32	37	32
$70 < L_d \leq 75$	42	37	42	37
$L_d > 75$	47	42	47	42

⁽¹⁾ En edificios de uso no hospitalario, es decir, edificios de asistencia sanitaria de carácter ambulatorio, como despachos médicos, consultas, áreas destinadas al diagnóstico y tratamiento, etc.

Tabla 5 Valores recomendados de aislamiento a ruido aéreo $D_{2m, nT, Atr}$ entre un recinto protegido y el exterior en función del índice de ruido día, L_d ⁶.

Según el DB-HR los valores de tiempo de reverberación recomendados para aulas son los siguientes:

- El tiempo de reverberación en aulas y salas de conferencias vacías (sin ocupación y sin mobiliario), cuyo volumen sea menor que 350 m³, no será mayor que 0,7 s.
- El tiempo de reverberación en aulas y en salas de conferencias vacías, pero incluyendo el total de las butacas, cuyo volumen sea menor que 350 m³, no será mayor que 0,5 s.

Además, podemos calcular la absorción acústica necesaria para conseguir el tiempo de reverberación propuesto mediante dos procedimientos descritos en dicho texto. El primero de ellos, reflejado en el Apartado 3.2.2 del DB-HR, consiste en el cálculo de la absorción acústica a partir del tiempo de reverberación y del volumen del recinto mediante la fórmula propuesta por Sabine y reflejada en este texto en el Capítulo 1 (Ecuación (1.13)).

La segunda opción, descrita en el apartado 3.2.3 del DB-HR, “Método de cálculo simplificado del tiempo de reverberación. Tratamientos absorbentes de los parámetros” nos propone la consecución del tiempo de reverberación propuesto a partir del tratamiento absorbente del techo. Además, en su Apartado 3.2.3.1, nos proporciona el valor mínimo del coeficiente de absorción acústica medio, $\alpha_{m,t}$, del techo suspendido para los siguientes casos:

- aulas de volumen hasta 350 m³
 - sin butacas tapizadas

$$\alpha_{m,t} = h \cdot \left(0,23 - \frac{0,12}{\sqrt{S_t}} \right). \quad (2.1)$$

⁶ Índice de ruido día, L_d : Índice de ruido asociado a la molestia durante el periodo día y definido como el nivel sonoro medio a largo plazo, ponderado A, determinado a lo largo de todos los periodos día de un año. Se expresa en dBA.

- ii. con butacas tapizadas fijas

$$\alpha_{m,t} = h \cdot \left(0,23 - \frac{0,12}{\sqrt{S_t}} \right) - 0,26 . \quad (2.2)$$

siendo h la altura libre del recinto [m] y S_t área del techo [m^2].

Cabe destacar que ambos procedimientos son aplicables, siempre y cuando el aula tenga una geometría prismática recta o asimilable y un volumen inferior a $350 m^3$ por lo que, en caso contrario, estos parámetros serán los establecidos en la normativa municipal vigente que corresponda, en caso de que la haya, o será el ingeniero en cuestión quién decida qué valores serán los recomendables.

Además de los parámetros descritos, el DB-HR nos proporciona recomendaciones sobre las características exigibles tanto a los productos utilizados como a los elementos constructivos, así como, recomendaciones para la ejecución de la obra y el control de la misma, ya que todo esto puede ser determinante a la hora de obtener el aislamiento recomendado para el recinto en cuestión. Asimismo, en su Anejo K se incluyen varios modelos de fichas justificativas para respaldar documentalmente las decisiones tomadas tanto en aislamiento acústico como en absorción y tiempo de reverberación.

Por último, en el Anejo J, se facilitan distintas recomendaciones de diseño acústico para aulas y salas de conferencias con el objetivo de mejorar la inteligibilidad de palabra, las cuales, se enumeran a continuación.

- 1- Deben evitarse los recintos cúbicos o con proporciones entre lados que sean números enteros.
- 2- En cuanto a la distribución de los materiales absorbentes, se recomienda una de las dos opciones de diseño siguientes (Figura 28).
 - a. Opción 1: Se dispondrá un material absorbente acústico en toda la superficie del techo, la pared frontal será reflectante y la pared trasera será absorbente acústica para minimizar los ecos tardíos;
 - b. Opción 2: Se dispondrá un material absorbente acústico en el techo, pero sólo se cubrirá la parte trasera del techo, dejando una banda de 3 m de ancho de material reflectante en la parte delantera del techo. La pared frontal será reflectante y en la pared trasera se dispondrá un material absorbente acústico de coeficiente de absorción acústica similar al del techo.
- 3- Para valores iguales de absorción acústica total de los elementos que componen el recinto, es más recomendable disponer un pasillo central que dos pasillos laterales para el acceso de alumnos.



Figura 28 Vista en planta de las opciones de diseño de aulas 1 y 2.

3. LAS AULAS

3.0 Introducción

Con este tercer capítulo se persigue obtener una idea clara de la situación, geometría y uso de los dos tipos de aulas que se van a estudiar.

En el Apartado 4.1 se proporciona la historia del Edificio Sabatini, en el cual se encuentran las aulas, y los diferentes usos a los que ha estado sujeto este emblemático edificio a lo largo de los años. El apartado 4.2 describe la situación geográfica del campus E.P.S. de la Universidad Carlos III de Madrid, que es donde se encuentra el Edificio Sabatini y, por tanto, las aulas. Por último, el Apartado 4.3 describe las características geométricas y acústicas de las aulas pequeñas y grandes.

3.1 Historia

Las aulas bajo estudio se encuentran en el Edificio Sabatini (Figura 29) de la EPS en la Universidad Carlos III de Madrid (España). En este edificio se imparten clases de Telecomunicaciones, Informática e Ingeniería Industrial y consta de tres plantas más una planta baja con una superficie total de 25.474 m².



Figura 29 Simulación 3D del edificio Sabatini de la uc3m.

Este edificio histórico para el municipio de Leganés fue diseñado por el arquitecto italiano Francisco Sabatini; (Palermo 1722 - Madrid; 1797) en siglo XVIII para albergar las guardias Walonas, creadas el 10 de abril de 1702 por el Rey Felipe V, y desde entonces tuvo un uso militar.

La rehabilitación de este edificio fue llevada a cabo por el también arquitecto Ricardo López de Rego y Uriarte, y las obras fueron ejecutadas por la constructora FCC Construcciones de mayo de 1997 a julio de 1998, con un presupuesto total de 9.653.790 €.

La transformación de este edificio para la docencia ha supuesto una completa modernización de sus instalaciones, pero siempre manteniendo el espíritu original del mismo. Este edificio departamental posee veinte grandes aulas en su planta tercera, cubiertas con una bóveda de madera. El resto de las plantas están ocupadas por más aulas para la docencia, aulas de seminario, despachos para profesorado y dirección de la

3.3. Descripción de las aulas

Las aulas tienen forma de paralelepípedo y su principal característica es la geometría abovedada de los techos, lo cual, puede hacer que tengamos ciertas concentraciones de sonido. Por otro lado, el gran volumen de las mismas, influye directamente en el elevado tiempo de reverberación que presentan, perjudicando la inteligibilidad del mensaje oral.

De las veinte aulas de la planta tercera del Edificio Sabatini, hay un total de 12 aulas denominadas en este proyecto “pequeñas” y 8 aulas de mayor dimensión denominadas “grandes”. A continuación se describirán con detalle las características acústicas y geométricas de estos dos tipos de aula.

3.2.1 Aulas pequeñas

Las aulas pequeñas tienen un volumen de $554,73 \text{ m}^3$ y una capacidad total de 73 personas distribuidas en tres áreas de audiencia, como podemos ver en la Figura 32 y en la Figura 33.



Figura 32 Vista lateral desde ventanas.



Figura 33 Vista lateral desde las puertas.

Las aulas pequeñas están compuestas por varios materiales, principalmente madera (mesas), mármol (suelo) y ladrillo revocado y pintado (paredes). Además de estos materiales, podemos ver en la Figura 34 que nos encontramos otros como los paneles de madera que revisten la semicircunferencia entre la pared y el techo y el propio techo, excluyendo las vigas que son de madera maciza.



Figura 34 Vista del techo desde atrás.

Otra característica del aula, como vemos en la Figura 35, es que tiene todo el perímetro de la misma está recubierto por un zócalo de un material sintético de unos 2 mm de espesor con una apariencia de piedra pulida el cual tiene fines meramente decorativos. Además, queda rematado a la pared con un perfil de madera.

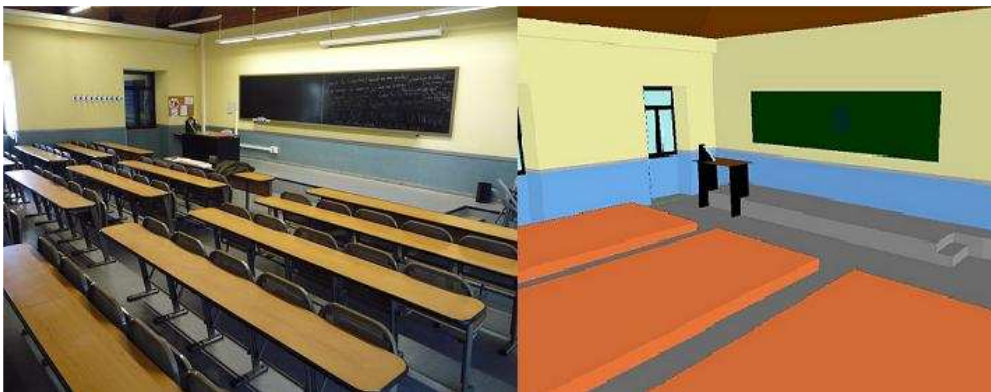


Figura 35 Vista desde la esquina trasera derecha.

Otro elemento a destacar por su relevancia, tanto en superficie como en absorción, son las puertas que están construidas en metal (Figura 36) y con grandes cristales opacos, los cuales proporcionan luminosidad al aula pero a costa de disminuir notablemente la absorción y el aislamiento del recinto.



Figura 36 Vista desde la esquina trasera izquierda.

Finalmente, decir que la única “consideración acústica” que se ha tenido en el proceso de diseño de estas aulas es el estrado que tiene una altura de unos 0,7 m y está revestido con losas de mármol al igual que el suelo y permite que la proyección del orador hacia los alumnos sea más directa.

3.2.2 Aulas grandes

Estas aulas, con un volumen cada una de 822,77 m³ y una capacidad para 120 personas distribuidas en tres grandes áreas de audiencia, son las más grandes de los dos tipos que vamos a estudiar. Presumiblemente, al tener mucho más volumen, siendo los materiales de ambas prácticamente iguales, el tiempo de reverberación que obtendremos en éstas será mayor, por lo que la inteligibilidad de palabra dentro de estas aulas será, en principio, peor.



Figura 37 Vista desde la esquina trasera izquierda.

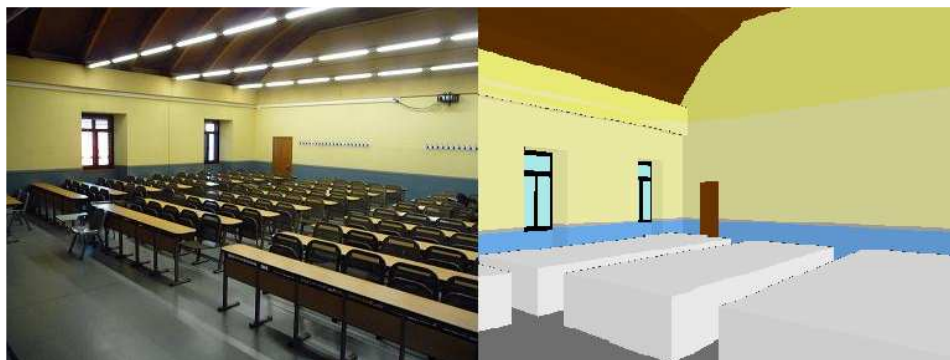


Figura 38 Vista desde la esquina delantera izquierda.

Como vemos en las Figuras 37, 38, 39, y 40, la única diferencia notable entre ambos tipos de aula es simplemente el mayor volumen de este segundo tipo. Además, al ser más grande, tenemos una puerta y una ventana más, por lo que aumentan las superficies reflectantes dentro del recinto.



Figura 39 Vista lateral de las puertas.



Figura 40 Vista lateral de las ventanas.

Otra pequeña diferencia es que las aulas grandes poseen una puerta de madera, como podemos ver en la Figura 41, en su parte trasera que comunica directamente con el aula contigua.

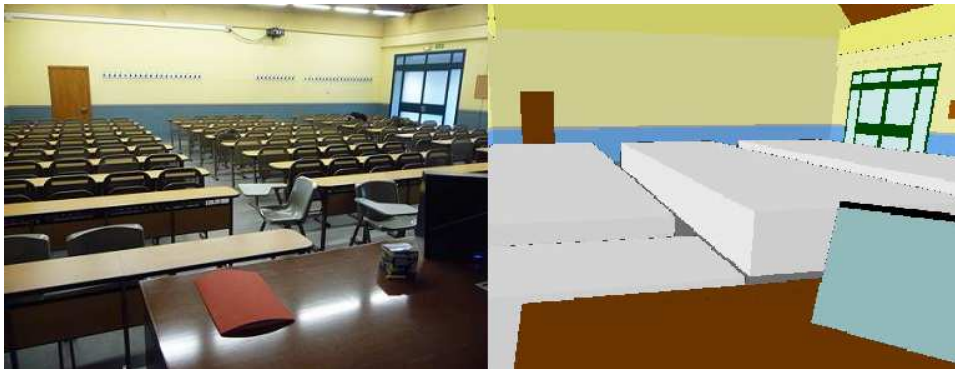


Figura 41 Vista desde la mesa del profesor.

En la Figura 42 podemos ver un detalle del techo. Los techos de ambos tipos de aula son exactamente iguales. Como podemos observar, en la simulación realizada no se han incluido las vigas ya que al construir el modelo con un alto nivel de detalle la complejidad de dibujar éstas se hacía enorme en comparación con la influencia que pudieran tener en la acústica del recinto.



Figura 42 Vista del techo desde la parte trasera.

En estas aulas nos encontramos con que se han colocado unas planchas de una fibra mineral de alta densidad en el semicírculo entre la pared y el techo, como se puede apreciar en la Figura 43, y en las partes superiores de las paredes laterales para disminuir, en la medida de lo posible, el elevado tiempo de reverberación del recinto. No sabemos si se incluyeron en el momento de ejecución de la obra o a posteriori, pero el resultado de las mismas es notable, en comparación con las aulas pequeñas.

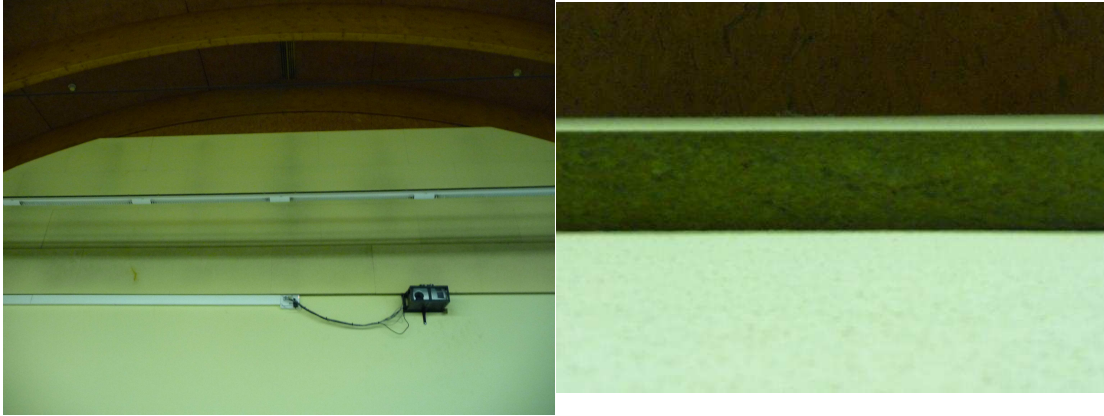


Figura 43 Detalle de las planchas de fibra mineral.

4. MEDIDAS “IN SITU”

4.0 Introducción

El objetivo principal de este capítulo es la familiarización con la instrumentación necesaria para llevar a cabo las medidas “in situ” de tiempo de reverberación y ruido de fondo, usando la normativa vigente para su ejecución. Estas dos medidas son las que necesitaremos para efectuar la simulación del campo sonoro en el interior de las aulas.

En el Apartado 4.1 describiremos cada uno de los elementos que formar el equipamiento de medida. En los Apartados 4.2, 4.3 y 4.4 se describirán tanto el montaje como el procedimiento a seguir según la normativa vigente.

4.1 Material necesario

El equipo necesario para realizar las medidas “in situ” que se van a llevar a cabo en cada uno de los diferentes tipos de aula bajo estudio son los que se indican a continuación.

4.1.1. Symphonie

Todas las medidas realizadas se llevarán a cabo mediante el sistema Symphonie. Dicho sistema, el cual se puede ver en la Figura 44, consiste en una unidad de adquisición de dos canales que transfiere todos los datos en tiempo real a un ordenador a través de una conexión PCMCIA.



Figura 44 Unidad de adquisición Symphonie.

Este sistema permite realizar tanto medidas de ruido como de vibraciones a través de distintas interfaces de usuario dependiendo del tipo de medición a realizar. En este caso usaremos el software de acústica en edificios dBbati32, el cual nos permite realizar tanto medidas de tiempo de reverberación y espectros como aislamiento acústico a ruido aéreo y de impacto siguiendo las normas UNE EN ISO 140, UNE EN ISO 717 y NBE CA-88.

4.1.2. Micrófono

El micrófono que se va a usar es el que vemos en la Figura 45, el cual pertenece a la empresa G.R.A.S. y está basado en un transductor de condensador de $\frac{1}{2}$ " con una sensibilidad de 49,52 mV/Pa, gracias al cual se consigue una elevada precisión en las medidas de presión. Además, cabe destacar que dicho micrófono es de tipo omnidireccional.



Figura 45 Micrófono G.R.A.S. de $\frac{1}{2}$ " tipo 40AF.

4.1.3. Preamplificador

El preamplificador es un elemento que adapta la impedancia de salida del micrófono de medida, que es elevada a la impedancia de entrada del equipo de medida, en este caso el Symphonie.



Figura 46 Preamplificador PRE 21 A de 01 dB.

En este caso se ha usado el preamplificador PRE 21 A de la marca 01 dB-Metravib, el cual podemos ver en la Figura 46.

4.1.4. Generador de ruido rosa

Para analizar el comportamiento de cada una de las aulas se pueden usar para excitar el recinto, bien sonidos impulsivos, o bien ruido de banda ancha. Debido a que se usará un analizador CPB, cuyo banco de filtros de tercio de octava es de anchura creciente en función de la frecuencia, se utilizará el ruido rosa como señal excitadora de las mismas. El motivo de esto es que dicho ruido compensa el efecto de ese incremento en la anchura de los filtros debido a que su densidad espectral de potencia es inversamente proporcional a la frecuencia, de forma que en un analizador CPB su espectro aparecerá plano.

4.1.5. Fuente dodecaédrica

Según la normativa vigente [13] la fuente sonora a usar en este tipo de mediciones ha de ser omnidireccional y con una respuesta en frecuencia razonablemente plana. Por este motivo, la fuente será una dodecaédrica como la que podemos ver en la Figura 47, la cual posee un diagrama polar similar al que vemos en la Figura 48.



Figura 47 Fuente dodecaédrica.

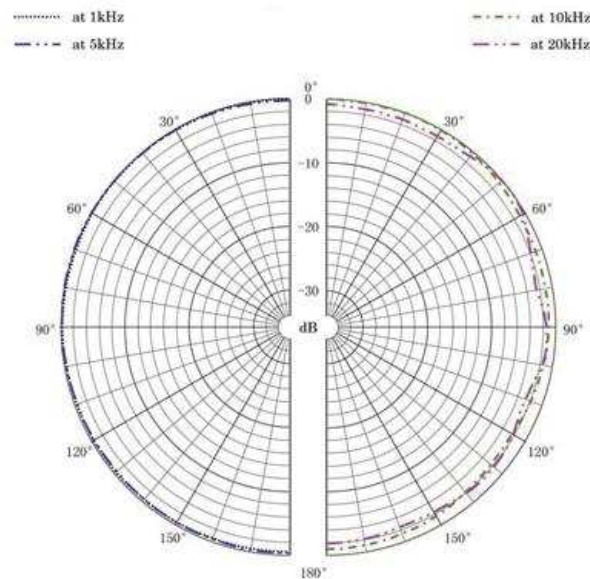


Figura 48 Diagrama polar de fuente omnidireccional para 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz y 20 kHz.

4.1.6. Amplificador de potencia

Para alimentar la fuente dodecaédrica con la señal de emisión necesitaremos amplificar la señal previamente mediante un amplificador de potencia. Para ello se ha usado un amplificador de potencia de la marca *InterM* L1400 (Figura 49) con una potencia por canal de 280 W a 8 Ω .

Además, es necesario tener un nivel suficiente de señal de salida debido a que la norma establece que el amplificador debe ser capaz de emitir un nivel de presión sonora de pico suficiente para asegurar una curva de caída que comience al menos 45 dB por encima del ruido de fondo en la banda de frecuencia correspondiente, o por encima de 35 dB si sólo se pretende medir el T20⁷.



Figura 49 Amplificador de potencia *InterM* L1400.

4.2. Montaje y procedimiento

Para realizar las medidas del tiempo de reverberación y ruido de fondo, las cuales se necesitan para ajustar la simulación acústica por ordenador, aplicaremos la norma vigente. Concretamente, el Apartado 4.3 describe el procedimiento de medida del ruido de fondo, y el apartado 4.4 se centra en la medida del tiempo de reverberación siguiendo la norma correspondiente.

El montaje necesario para llevar a cabo estas medidas se muestra en la Figura 50, y podemos verlos implementado en la Figura 51.

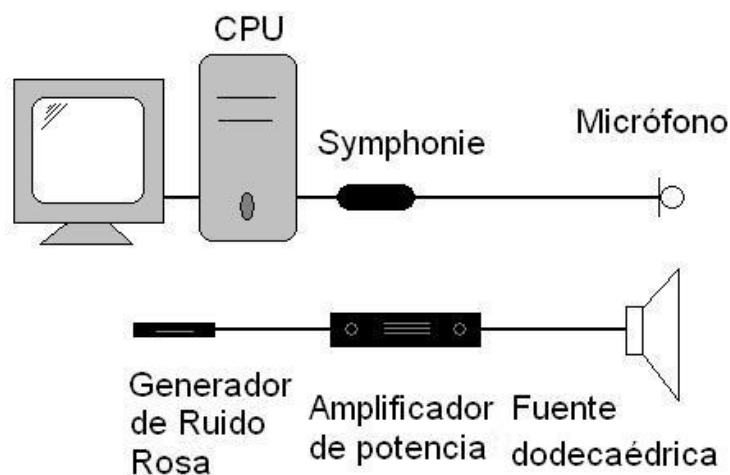


Figura 50 Diagrama de conexionado del equipo de medición.

⁷ T20: Cuando no tenemos suficiente margen dinámico podemos calcular el tiempo de reverberación como el tiempo que tarda en descender la señal 20 dB, a partir de la interrupción de la fuente, y multiplicar el resultado por tres. De igual manera, podremos calcular el T30 como el tiempo que tarda en descender la señal 30 dB, a partir de la interrupción de la fuente, y multiplicar el resultado por 2.



Figura 51 Montaje del equipo de medición.

4.3. Medida del ruido de fondo

Como ya se ha comentado, el ruido de fondo es toda aquella señal que se percibe en la sala en cuestión cuando no hay ninguna fuente emitiendo sonido. En función del nivel del mismo influirá más o menos en la escucha de lo que queremos percibir.

Una de las cuestiones que entran en juego dentro del nivel de ruido de fondo es el aislamiento de la sala contra la penetración de sonidos procedentes de fuentes externas. Estos ruidos se transmiten al interior de la sala, perdiendo parte de su energía, y se suman a los ruidos existentes en la sala debido al uso normal de la misma, como son los sistemas de iluminación, refrigeración o informáticos.

Para realizar esta medida únicamente es necesario colocar el micrófono en diferentes puntos de la sala y tomar muestras del nivel de presión sonora para todas las bandas de frecuencia. En nuestro caso hemos decidido tomar muestras en seis puntos diferentes de la misma y, con estos datos, realizar el promedio energético de los valores consiguiendo, de este modo, un solo valor promedio para cada una de las bandas de tercios de octava.

El valor promedio para una de las aulas pequeñas de los resultados de las seis diferentes posiciones proporcionado por el programa dBbati32 es el que vemos en la Figura 52.

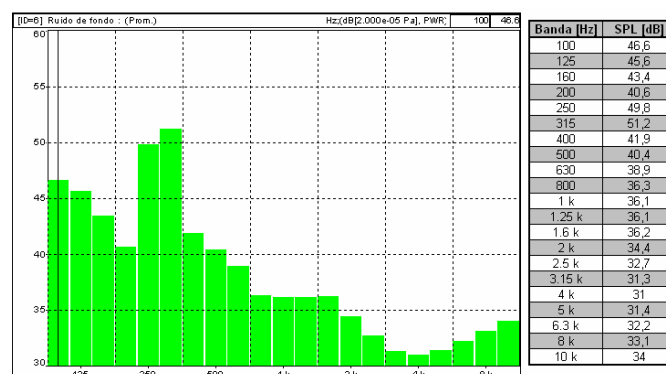


Figura 52 Valor promedio del ruido de fondo en las aulas pequeñas.

Y el obtenido en una de las aulas grandes está reflejado en la Figura 53.

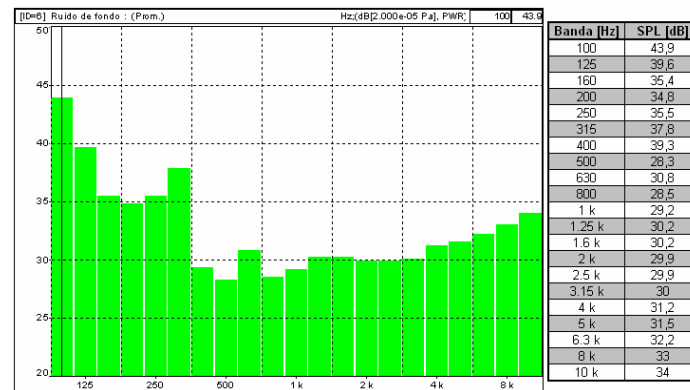


Figura 53 Valor promedio del ruido de fondo en las aulas grandes.

4.4. Medida del tiempo de reverberación

Como ya se ha definido con anterioridad, el tiempo de reverberación a una determinada frecuencia es el tiempo que transcurre desde que una fuente deja de emitir hasta que el nivel de la señal decae 60 dB.

Para medir dicho parámetro seguiremos el método de ingeniería descrito en la norma UNE-EN ISO 3382-2: “Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios” [13].

La primera recomendación que nos proporciona la norma es que, cuando sea posible, las mediciones se realizarán sin la presencia de personas en el interior ya que podría influir mucho en la medida del tiempo de reverberación dependiendo del tipo de recinto en estudio. Sin embargo, se suele permitir que un recinto con hasta dos personas represente su estado vacío.

En la Tabla 6 [13] podemos ver los números mínimos de posiciones de medición que necesitaremos para obtener una cobertura adecuada. Además, nos indican que en caso de que el recinto presente una geometría complicada el número de posiciones deberá ser mayor.

Algunas de las recomendaciones a la hora de realizar las diferentes medidas del tiempo de reverberación son:

- Posiciones entre micrófonos separadas al menos media longitud de onda, 2 m para el margen de frecuencias habitual.
- La distancia entre el micrófono y cualquier superficie reflectante, incluido el suelo será de, al menos, un cuarto de longitud de onda, 1m para el margen de frecuencias habitual.
- Se deberán evitar posiciones simétricas y cercanas.
- Ninguna posición de micrófono deberá estar cercana a la fuente para intentar evitar una influencia excesiva del sonido directo. La distancia mínima podrá ser:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{V}{cT}}, \quad (4.1)$$

siendo c la velocidad del sonido en metros por segundos, y \hat{T} una estimación del tiempo de reverberación en segundos.

	Control	Ingeniería ^a	Precisión
Combinaciones fuente-micrófono	2	6	12
Posiciones de la fuente ^b	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Posiciones de micrófono ^c	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Número de decrecimientos en cada posición (método del ruido interrumpido)	1	2	3
^a Cuando el resultado se utiliza para un término de corrección en otras mediciones del nivel de ingeniería, solo se requiere una posición de la fuente y tres posiciones de micrófono. ^b Para el método del ruido interrumpido, se pueden utilizar simultáneamente fuentes no correlativas. ^c Para el método del ruido interrumpido y cuando el resultado se utiliza para un término de corrección, se puede utilizar una percha de micrófono rotativo en lugar de múltiples posiciones de micrófono.			

Tabla 6 Número mínimo de posiciones y mediciones [13].

La norma UNE-EN ISO 3382-2 establece tres métodos (Tabla 6) para la medición del tiempo de reverberación: método de control, método de ingeniería, y método de precisión. En nuestro caso hemos empleado el método de ingeniería porque es el que más se ajusta a uno de los propósitos de este proyecto, que es verificar el comportamiento del recinto en estudio con respecto a ciertas recomendaciones de tiempo de reverberación específicas para aulas. Además, debido al carácter difuso de estas aulas, este método proporciona una cantidad mínima de mediciones razonablemente elevada para garantizar unos resultados de tiempo de reverberación realistas.

Concretamente, hemos decidido efectuar las medidas para dos posiciones de fuente, 5 posiciones de micrófono por cada una de las posiciones de fuente, y dos caídas de T30 por posición de micrófono. En definitiva, un total de 20 mediciones se llevaron a cabo.

Los resultados del tiempo de reverberación obtenidos en una de las aulas pequeñas son los que se muestran en la Tabla 7.

Banda [Hz]	(Med. 1)	(Med. 2)	(Med. 3)	(Med. 4)	(Med. 5)	(Med. 6)	(Med. 7)	(Med. 8)	(Med. 9)	(Med. 10)	(Med. 11)	(Med. 12)	(Med. 13)	(Med. 14)	(Med. 15)	(Med. 16)	(Med. 17)	(Med. 18)	(Med. 19)	(Med. 20)	T _{prom}	Desviación típica sigma T30 [s]
100	1.94	2.40	1.64	2.47	3.00	2.65	2.30	2.50	2.97	2.76	2.19	2.18	2.51	2.65	2.66	1.72	3.02	2.52	2.11	3.05	2.47	0.04
125	1.92	2.50	2.51	2.45	1.94	2.06	2.25	2.89	2.63	2.48	1.98	2.34	2.38	2.17	2.72	2.84	2.68	1.79	2.38	2.80	2.39	0.04
160	1.72	2.05	2.26	2.16	1.80	1.88	2.21	1.34	1.88	2.24	1.74	1.86	2.52	1.64	2.01	2.44	1.83	2.13	1.98	2.30	1.99	0.03
200	2.22	2.43	2.19	2.04	2.52	2.62	2.22	2.60	2.37	2.47	1.64	1.95	2.25	2.52	2.40	2.43	2.32	2.12	2.47	2.13	2.30	0.03
250	2.02	2.54	2.22	2.27	2.80	2.31	2.85	2.49	1.87	2.00	1.93	2.33	2.97	2.37	3.00	2.81	2.72	2.44	2.72	2.13	2.44	0.03
315	2.46	2.56	2.69	3.14	2.62	2.75	2.73	2.73	2.57	2.58	2.61	2.54	2.92	2.77	3.24	3.08	2.59	2.49	2.59	2.55	2.71	0.03
400	2.91	2.84	2.69	2.82	2.93	2.87	2.62	2.54	2.80	2.80	3.04	2.74	2.51	2.52	2.74	2.43	2.40	2.54	2.79	2.25	2.68	0.02
500	2.70	2.36	2.56	2.82	2.67	2.66	2.26	2.31	2.34	2.53	2.56	2.47	2.71	2.62	2.23	2.55	2.24	2.55	2.35	2.35	2.49	0.02
630	2.83	2.83	3.09	2.88	2.74	2.94	2.63	2.99	2.73	2.79	2.37	2.63	2.65	2.70	2.82	2.92	2.74	2.99	2.70	2.78	2.79	0.02
800	2.73	2.93	2.92	3.09	3.18	3.09	3.05	3.16	2.88	3.11	2.59	2.78	2.96	2.98	3.04	2.82	2.77	2.77	2.81	2.89	2.93	0.02
1000	2.84	2.88	2.81	3.00	3.04	2.92	2.79	2.77	2.94	2.75	2.86	2.80	2.88	2.89	2.86	2.86	2.89	2.83	2.80	2.88	2.85	0.01
1250	2.70	2.75	2.67	2.89	2.85	2.77	2.84	2.71	2.76	2.63	2.48	2.73	2.62	2.73	2.87	2.89	2.73	2.70	2.76	2.78	2.73	0.01
1600	2.46	2.45	2.32	2.48	2.39	2.35	2.64	2.60	2.55	2.42	2.54	2.28	2.46	2.57	2.64	2.47	2.46	2.56	2.40	2.50	2.48	0.01
2000	2.33	2.43	2.28	2.34	2.28	2.36	2.36	2.26	2.27	2.26	2.28	2.16	2.36	2.33	2.44	2.36	2.43	2.34	2.28	2.27	2.32	0.01
2500	2.04	2.11	2.15	2.19	2.13	2.11	2.32	2.24	2.22	2.14	2.16	2.16	2.12	2.16	2.22	2.08	2.17	2.21	2.14	2.06	2.16	0.01
3150	1.96	1.99	1.98	2.04	2.05	2.04	2.04	2.06	2.07	2.03	1.85	1.89	2.01	2.06	1.97	1.92	2.02	2.00	1.98	1.98	2.00	0.01
4000	1.82	1.78	1.86	1.87	1.80	1.81	1.86	1.85	1.95	1.83	1.79	1.81	1.74	1.84	1.82	1.89	1.77	1.92	1.84	1.79	1.83	0.01
5000	1.56	1.56	1.60	1.66	1.57	1.55	1.62	1.56	1.62	1.62	1.53	1.55	1.50	1.56	1.58	1.59	1.55	1.56	1.58	1.52	1.57	0.00
6300	1.28	1.26	1.37	1.32	1.30	1.33	1.45	1.44	1.30	1.37	1.26	1.29	1.30	1.30	1.29	1.36	1.32	1.30	1.38	1.29	1.33	0.00
8000	1.02	1.11	1.11	1.19	1.05	1.06	1.18	1.07	1.09	1.05	1.03	1.04	0.97	0.94	1.08	1.12	1.09	1.00	0.99	1.03	1.06	0.00
10000	0.94	1.13	0.97	1.11	0.91	0.94	0.95	0.95	0.96	0.89	0.87	0.92	0.94	0.95	0.84	0.84	0.91	0.90	0.83	0.81	0.93	0.00

Tabla 7 Resultados del tiempo de reverberación para todos los puntos medidos en el aula pequeña e incertidumbre⁸.

⁸ Según la norma UNE-EN ISO 3382-2: “Debido a la naturaleza aleatoria de la señal de excitación, la incertidumbre de medición depende mucho del número de promedios realizados. La desviación típica del resultado de medición $\sigma(T_{30})$, en segundos, se puede estimar a partir de: $\sigma(T_{30}) = 0.55T_{30} \sqrt{\frac{1+(1.52/n)}{NBT_{30}}}$, siendo n el número de decrecimientos medios en cada posición, N el número de

posiciones de medición independiente y $B=0.71f_c$ el ancho de banda para filtros de octava en hertzios, donde f_c es la frecuencia media del filtro, en hertzios”.

Asimismo, En la Tabla 8 se incorporan los resultados de tiempo de reverberación para las aulas grandes.

	(Med. 1)	(Med. 2)	(Med. 3)	(Med. 4)	(Med. 5)	(Med. 6)	(Med. 7)	(Med. 8)	(Med. 9)	(Med. 10)	(Med. 11)	(Med. 12)	(Med. 13)	(Med. 14)	(Med. 15)	(Med. 16)	(Med. 17)	(Med. 18)	(Med. 19)	(Med. 20)	(Promt)	
Banda [Hz]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	T [s]	Desviación típica sigma T30 [s]	
100	2,21	2,29	1,97	1,47	2,41	2,12	2,05	2,15	2,28	2,22	2,21	2,62	2,13	2,08	2,12	2,04	2,57	2,46	2,09	2,32	2,21	0,04
125	1,75	1,45	2,06	1,59	1,51	1,74	2,36	1,66	1,76	2,31	1,87	2,10	1,21	1,51	1,32	2,18	1,98	1,49	1,43	1,47	1,75	0,03
160	1,56	1,42	1,52	1,39	1,31	1,72	1,68	2,01	1,48	1,28	1,49	1,65	1,24	0,98	1,74	1,50	1,97	1,42	1,76	2,06	1,56	0,03
200	1,56	1,53	1,39	1,67	1,48	1,39	1,19	2,04	1,42	1,22	1,38	1,39	1,53	1,50	1,66	1,95	1,72	1,90	1,61	1,64	1,56	0,02
250	1,73	1,95	2,04	2,17	1,55	1,24	1,66	1,99	1,37	1,54	1,56	1,79	1,75	1,67	2,07	1,85	1,74	1,76	1,51	1,70	1,73	0,02
315	1,63	1,73	1,69	1,46	1,74	1,52	1,29	1,27	1,80	1,59	1,22	1,65	1,74	1,74	2,39	1,66	1,13	1,62	1,79	2,14	1,63	0,02
400	1,46	1,55	1,50	1,78	1,34	1,42	1,47	1,45	1,27	1,46	1,35	1,28	1,36	1,24	1,80	1,66	1,40	1,41	1,59	1,43	1,46	0,02
500	1,35	1,34	1,27	1,29	1,26	1,36	1,27	1,21	1,42	1,29	1,20	1,23	1,41	1,32	1,72	1,48	1,50	1,26	1,36	1,45	1,35	0,01
630	1,38	1,24	1,42	1,52	1,40	1,25	1,35	1,36	1,39	1,36	1,24	1,35	1,45	1,45	1,37	1,39	1,39	1,43	1,44	1,42	1,38	0,01
800	1,45	1,43	1,50	1,52	1,35	1,35	1,51	1,52	1,33	1,38	1,50	1,42	1,40	1,55	1,30	1,61	1,51	1,58	1,55	1,46	1,45	0,01
1000	1,39	1,52	1,31	1,42	1,38	1,37	1,45	1,41	1,46	1,37	1,40	1,36	1,38	1,41	1,36	1,42	1,23	1,45	1,37	1,32	1,39	0,01
1250	1,40	1,35	1,43	1,49	1,40	1,48	1,34	1,39	1,47	1,35	1,39	1,39	1,33	1,38	1,41	1,40	1,42	1,34	1,44	1,32	1,40	0,01
1600	1,35	1,34	1,35	1,34	1,33	1,32	1,37	1,35	1,28	1,32	1,27	1,30	1,37	1,44	1,36	1,33	1,39	1,42	1,33	1,42	1,35	0,01
2000	1,31	1,38	1,22	1,32	1,24	1,34	1,28	1,36	1,28	1,25	1,39	1,33	1,35	1,37	1,33	1,32	1,35	1,25	1,19	1,35	1,31	0,01
2500	1,28	1,25	1,30	1,26	1,29	1,27	1,31	1,34	1,24	1,29	1,29	1,24	1,23	1,30	1,18	1,24	1,36	1,38	1,31	1,31	1,28	0,01
2150	1,22	1,24	1,20	1,13	1,18	1,21	1,25	1,27	1,22	1,23	1,25	1,20	1,25	1,24	1,18	1,19	1,23	1,30	1,23	1,27	1,22	0,01
4000	1,18	1,19	1,17	1,15	1,18	1,13	1,20	1,19	1,18	1,16	1,22	1,20	1,18	1,19	1,15	1,14	1,20	1,19	1,13	1,14	1,18	0,00
5000	1,06	1,06	1,09	1,07	1,09	1,07	1,07	1,05	1,06	1,06	1,02	1,05	1,05	1,10	1,01	1,03	1,06	1,06	1,09	1,07	1,06	0,00
6300	0,96	0,97	0,96	0,94	0,99	0,98	0,95	0,92	1,01	0,98	0,94	0,91	0,98	1,00	0,93	0,93	0,96	0,88	1,01	0,97	0,96	0,00
8000	0,82	0,80	0,80	0,82	0,83	0,82	0,84	0,84	0,90	0,84	0,82	0,72	0,88	0,81	0,84	0,81	0,82	0,77	0,76	0,84	0,82	0,00
10000	0,75	0,74	0,84	0,91	0,72	0,66	0,76	0,73	0,75	0,82	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,72	0,80	0,76	0,69	0,78	0,75	0,00

Tabla 8 Resultados del tiempo de reverberación para todos los puntos medidos en el aula grande e incertidumbre.

5. SIMULACIÓN ACÚSTICA DE LAS AULAS

5.0 Introducción

El Capítulo 5 describe de forma detallada el proceso llevado a cabo para la simulación del campo sonoro actual presente en el interior de los dos tipos de aula.

Este capítulo se organiza de la siguiente forma. El Apartado 5.1 hace un esbozo de las principales herramientas del software de simulación acústica usadas en este proyecto. El Apartado 5.2 describe el proceso de creación de cada tipo de aula. El Apartado 5.3 se centra en el ajuste del modelo creado para las aulas con los resultados obtenidos en las medidas “in situ” descritas en el capítulo anterior. Finalmente, el Apartado 5.4 proporciona los resultados obtenidos de la simulación acústica.

5.1 Descripción del programa: EASE

En este apartado se pretende dar una visión general del software de predicción acústica EASE [25], el cual usaremos para realizar el modelo de las aulas a estudiar.

Este programa, desarrollado por la empresa alemana Renkus-Heinz, permite, desde su creación hace más de 15 años, tanto simular recintos que necesiten unas determinadas condiciones acústicas como probar todo tipo de altavoces para predecir su funcionamiento.

Para ello, se distribuye en diferentes módulos, enumerados a continuación, gestionados todos ellos desde el módulo principal:

EASE	Programa principal.
EASEBall	Programa globo.
EASEIMEX	Programa de importación / exportación.
EASERoom	Programa de edición de proyectos.
EASESpkr	Programa base de datos de altavoces.
EASEWall	Programa base de datos de materiales de superficies.
EASEMaps	Programa de mapas 2D.
EASEEyes	Programa de mapas 3D.
EASEClus	Programa de altavoces en cluster.
EASEProb	Programa de pruebas acústicas.
EASERays	Programa de trazado de rayos.
EASEEars	Programa de auralización.
EASEVisi	Programa de visualización.
EASEView	Programa de visualización EASE.
EASETape	Programa base de datos de texturas.
EASEBulb	Programa base de datos de fuentes de luz.
EASEPad	Programa de diseño de páginas EASE.
EASEGuard	Programa de control de licencias.
EASEibase	Programa base de datos de radiación IR.

Los diferentes módulos pueden ejecutarse independientemente del programa principal, lo cual nos proporciona una gran flexibilidad, pero necesita que los datos se intercambien entre los diferentes módulos del programa.

A pesar de que el programa cuente con todos estos módulos, la versión del programa de la que se dispone no usa tantos, por lo que solamente se mencionaran los que nos sean útiles para realizar este proyecto.

5.1.1 Módulo principal

Al ejecutar el programa aparece el módulo principal, el cual podemos ver en la Figura 54, en el que podemos definir un proyecto nuevo para empezar a trabajar desplegando el menú *File*. Además, una de las características de EASE es que podemos crear nuestro propio escritorio (parte derecha de la imagen) añadiendo los iconos de acceso directo a las funciones que usamos más frecuentemente.

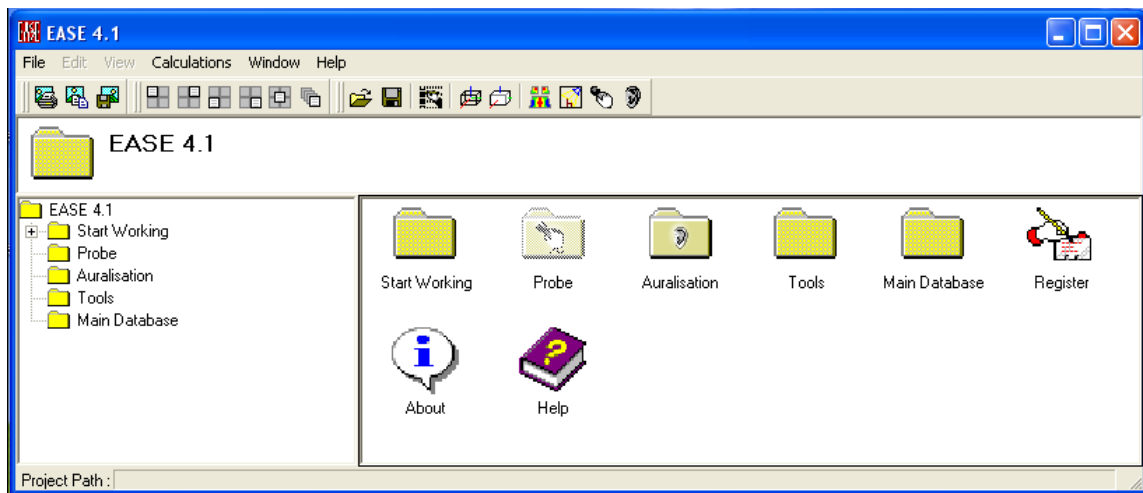


Figura 54 Vista del modulo principal de EASE (versión 4.1).

Otra de las funciones a las que podemos acceder desde el menú *File* es *Main Database* gracias a la cual podremos acceder a la base de datos de materiales y altavoces, entre otros, para su visualización, modificación o creación de nuevos en caso de que fuera necesario.

Además, dentro del menú desplegable *Calculations* podemos abrir los diferentes módulos de cálculo de que dispone EASE.

- *Area Mapping*: accede al módulo *Standard Mapping*.
- *Room Mapping*: accede al módulo *EYES*.
- *Ray Tracing*: accede al módulo *EASE Rays*.
- Los módulos *Probe Post Processing*, *Invoke Ears* y *Auralize File* no están disponibles en esta versión de EASE.

5.1.2. Editor de Proyectos (*Edit Project*)

Es en este módulo donde se realiza el modelo del recinto en estudio. Para ello, deberemos ir colocando puntos que, posteriormente, serán unidos para generar las diferentes caras del mismo.

Además, podemos escoger entre dibujar el recinto de forma simétrica, es decir, al introducir un punto el programa dibuja automáticamente su punto simétrico, o introducirlos todos uno a uno.

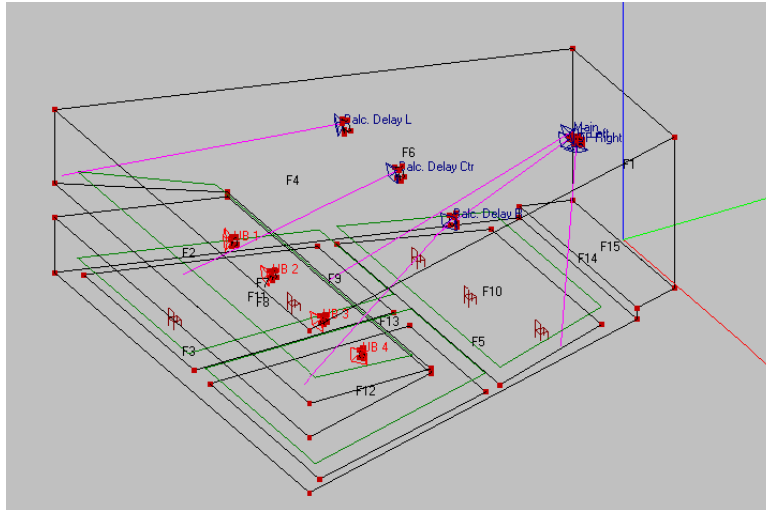


Figura 55 Vista del módulo de edición de proyectos.

Como vemos en la Figura 55, los ejes de coordenadas están representados por líneas de color verde (Y), rojo (X) y azul (Z). El punto de intersección de estas líneas corresponde a las coordenadas (0, 0, 0).

Una vez terminado todo el perímetro del recinto, deberemos introducir las áreas de audiencia, representadas en la Figura 55 en color verde. Estas áreas se corresponden con la zona en la que EASE llevará a cabo la simulación acústica, por lo que deberán situarse justo encima de la zona donde se encuentre el público y a la altura en que se hallen los oídos del mismo, normalmente a 1,2 m del suelo.

5.1.3. Módulo Eyes

A este menú podemos acceder desde el módulo principal (*View-Standard rendering*) o bien desde el módulo de edición de proyecto pinchando en el icono *Standard Rendering/Room Mapping* que vemos en la Figura 56.

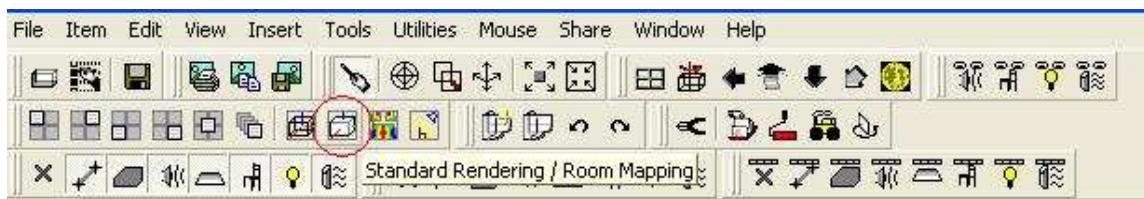


Figura 56 Barra de herramientas del módulo edición de proyecto.

En él tenemos una apariencia más sólida de las diferentes caras del recinto y podemos ver el mismo desde diferentes puntos de vista, ya sea, desde los altavoces, desde posiciones introducidas en las áreas de audiencia o cualquier parte del recinto mediante la herramienta *Walker*.

Además, en este módulo tenemos opción de calcular todos los parámetros que EASE nos proporciona para estudiar la acústica del recinto, los cuales se han descrito en el Apartado 1.4 y se expondrán los resultados en el Apartado 5.4 de este mismo capítulo.

5.1.4. Módulo Area Mapping

Este módulo (Figura 57) también nos permite la opción de calcular todos los parámetros acústicos proporcionados por EASE sin la necesidad de visualizar la geometría del recinto.

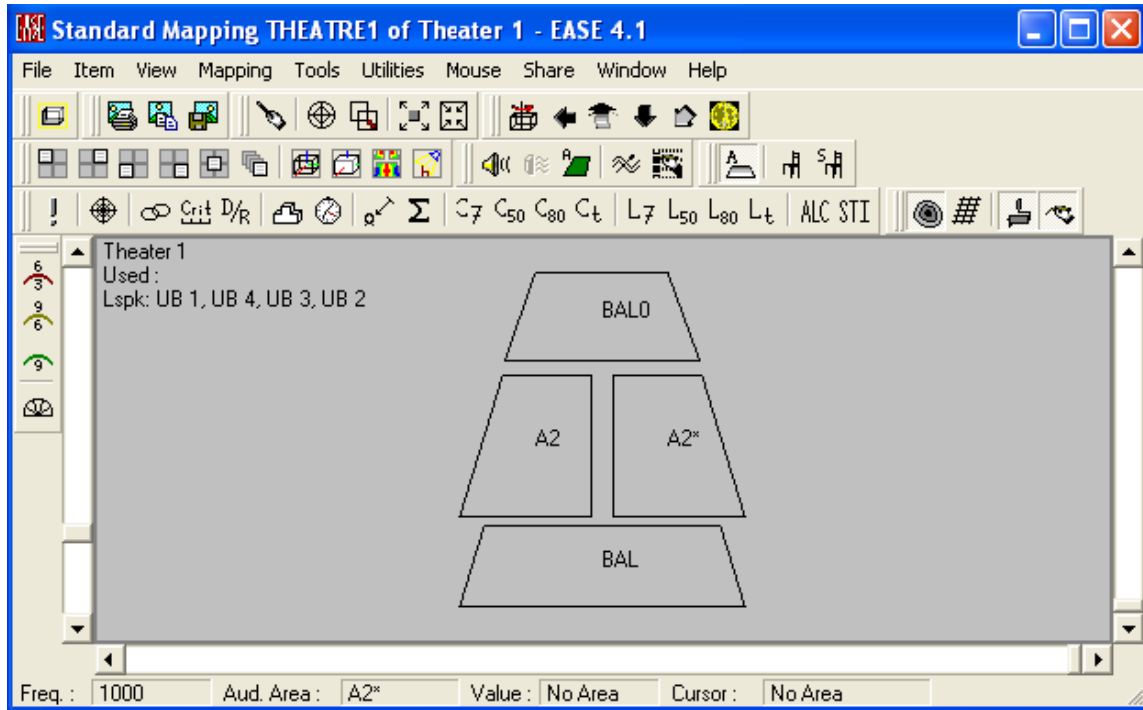


Figura 57 Módulo Area Mapping.

Existen dos formas para acceder al módulo *Area Mapping*. La primera de ellas será desde la pestaña *Calculations* en módulo principal del programa, mientras que la segunda permitirá acceder a él desde el módulo de edición de proyectos pulsando el icono que vemos en la Figura 58.

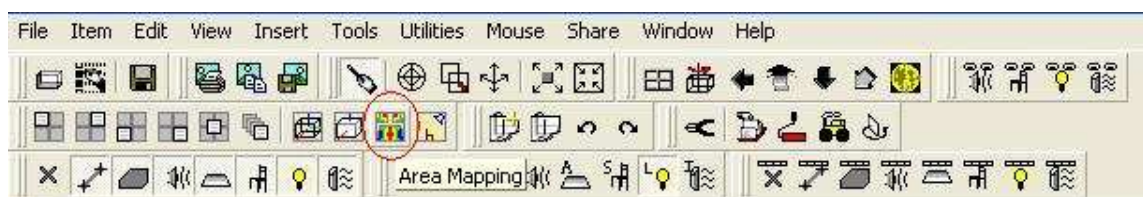


Figura 58 Botón de Area Mapping en la barra de herramientas de Edit Project.

Para calcular los parámetros acústicos proporcionados por EASE usaremos dos herramientas dentro de este módulo. La primera de ellas recibe el nombre de *Standard* y se encuentra dentro de la pestaña *Mapping* que vemos en la Figura 57. Esta herramienta nos proporcionará los resultados de la simulación acústica de los parámetros *Total SPL*, *C₅₀*, *ALCons%* y *RASTI*. La segunda herramienta, AURA⁹ (*Analysis Utility for Room Acoustic*), se encuentra en la misma pestaña y nos proporcionará los resultados de la Definición (D) y del EDT.

⁹ La diferencia de ésta con respecto a *Standard* es que, además del estudio de los diferentes parámetros que caracterizan el campo sonoro realiza, también, el cálculo completo de la respuesta al impulso.

5.1.5. Módulo Ray Tracing

Este módulo realiza un trazado de rayos emitidos por una fuente sonora siguiendo la teoría geométrica. Además nos permite realizar una simulación de trazado de rayos teniendo en cuenta sólo ciertas caras del modelo. Esto resulta muy interesante para estudiar los posibles efectos adversos producidos por ciertas superficies relevantes de los recintos.

Para acceder a dicho módulo podremos hacerlo desde el módulo principal pulsando en la pestaña *Calculations-Ray Tracing*. Al hacer esto, nos aparecerá una sencilla ventana, como la que vemos en la Figura 59, en la cual tenemos varios menús distribuidos en siete pestañas.

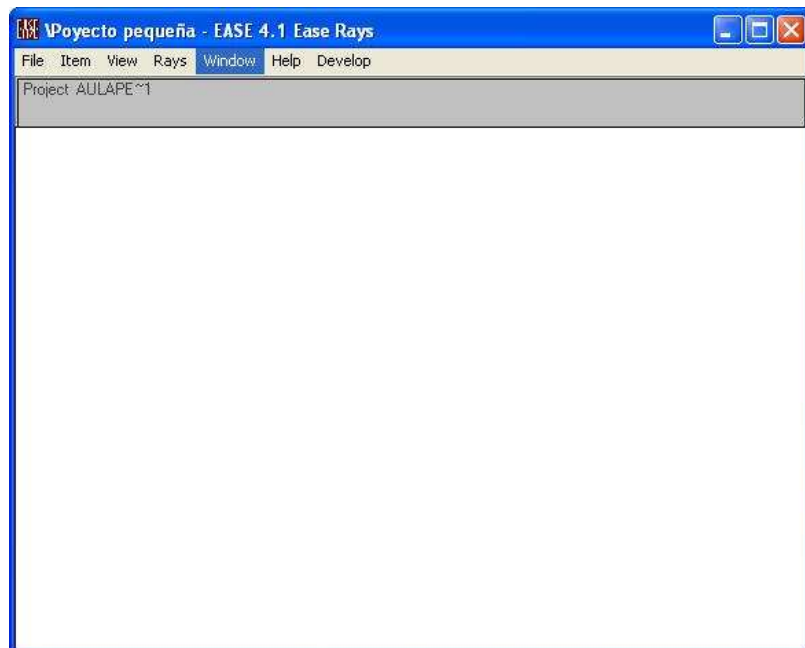


Figura 59 Ventana del módulo Ray Tracing.

En la pestaña *Item-Faces On* accedemos a otra ventana en la que podremos seleccionar las caras que queremos que se encuentren activas para el trazado de rayos, es decir, aquellas caras contra las que impactarán los rayos. Una vez definidas estas caras, accediendo al menú *Rays-Ray Tracing* se abrirá una nueva ventana (véase Figura 60) en la que se podrán seleccionar opciones del trazado de rayos como el orden de reflexión o la cantidad de rayos emitidos por fuente sonora, entre otras.

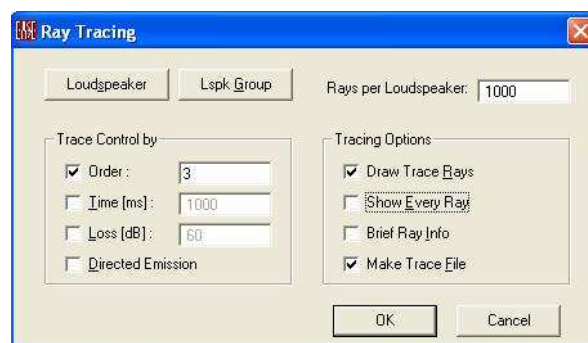


Figura 60 Ventana de opciones de Ray Tracing.

Una vez elegidas las opciones y pulsado el botón *OK* se abrirá una ventana en la que podremos ver representado el trazado de rayos.

5.1.6. Edición de materiales

Podemos acceder a esta aplicación desde el módulo principal del programa, dentro del menú *File* accediendo al submenú *Main Database* y, continuación, pinchando en *Wall Material*.

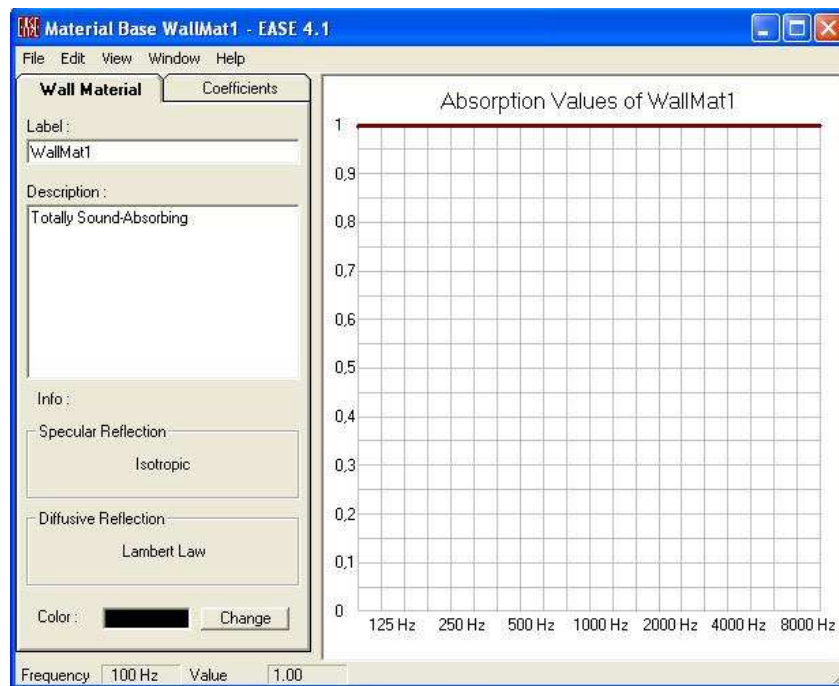


Figura 61 Ventana de la aplicación *Wall Material*.

En esta ventana, la cual se puede ver en la Figura 61, se podrán introducir los datos de absorción de un nuevo material o modificar los que existen en la base de datos de EASE accediendo al menú *Edit*. Además, cabe la posibilidad de introducir también los datos de dispersión (*scattering*) del material introduciendo los valores uno a uno, al igual que con la absorción, o usando la herramienta del menú *Edit-Calculate Scattering* que calcula automáticamente dicha dispersión en función del tipo de superficie del material.

5.2 Proceso de creación de las aulas

En este apartado se describirá el proceso que nos ha llevado a obtener la simulación final de las aulas.

Es importante destacar que antes de efectuar una simulación de este tipo es muy importante definir desde un principio el nivel de detalle que se va a emplear para procurar que el error introducido a la hora de realizar el modelo sea lo menor posible y, así, obtener la mayor exactitud en los parámetros calculados. No obstante, cabe esperar que los resultados de estos parámetros no se ajusten totalmente a la realidad por lo que habrá que ajustar primero el modelo con las mediciones “in situ” previamente realizadas para conseguir el mayor grado de exactitud.

5.2.1. Nivel de detalle

Como bien se ha dicho, es importante definir el nivel de detalle antes de efectuar una simulación por ordenador. En este proyecto el elemento constructivo más crítico a la hora de conseguir una buena resolución para el diseño del aula es el techo debido a su forma elíptica y su elevada superficie respecto de la total del recinto. Con EASE las superficies curvadas se modelan mediante un conjunto de superficies planas que cubren dicha área curvada, de modo que lo que “vería” la onda no sería una superficie curvada en sí, sino “irregularidades” de tamaño igual al ancho de cada superficie plana.

En principio cabría pensar que cuanto mayor sea la resolución del modelo de superficie elíptica (esto es, menor sea el ancho de cada superficie plana), más nos acercaremos al caso real. Sin embargo, hemos de tener en cuenta que un grado de detalle excesivo, además de aumentar la complejidad del modelo, también puede dar lugar a resultados irreales [22]. Por ello, es necesario llevar a cabo un estudio teórico y práctico acerca del nivel de detalle más adecuado para la superficie abovedada del aula, buscando un buen compromiso entre complejidad y fiabilidad del modelo. Una vez establecida la resolución máxima para el techo, el resto de superficies del recinto se simulará con una resolución igual o menor.

Cabe destacar que, por la manera en que se han realizado los modelos y las medidas geométricas de las aulas, los valores que determinan el nivel de detalle usado en la bóveda y, por tanto, el nivel de detalle final de la simulación, no son de los planos que forman la bóveda, sino de la distancia (d) entre las proyecciones de los puntos de la bóveda en la recta X (línea roja horizontal). Dicho de otro modo, para determinar la geometría de la bóveda se recogieron medidas de la altura de la misma cada $d=10$ cm siguiendo una línea recta a lo ancho del aula (véase Figura 62), por lo que a la hora de dibujar con un nivel de detalle de, por ejemplo, 1 m, se ponen puntos en el eje X cada 1 m y, posteriormente, mediante un medidor láser se miden sus alturas. De aquí en adelante denominaremos a esta distancia d como nivel de detalle inicial.

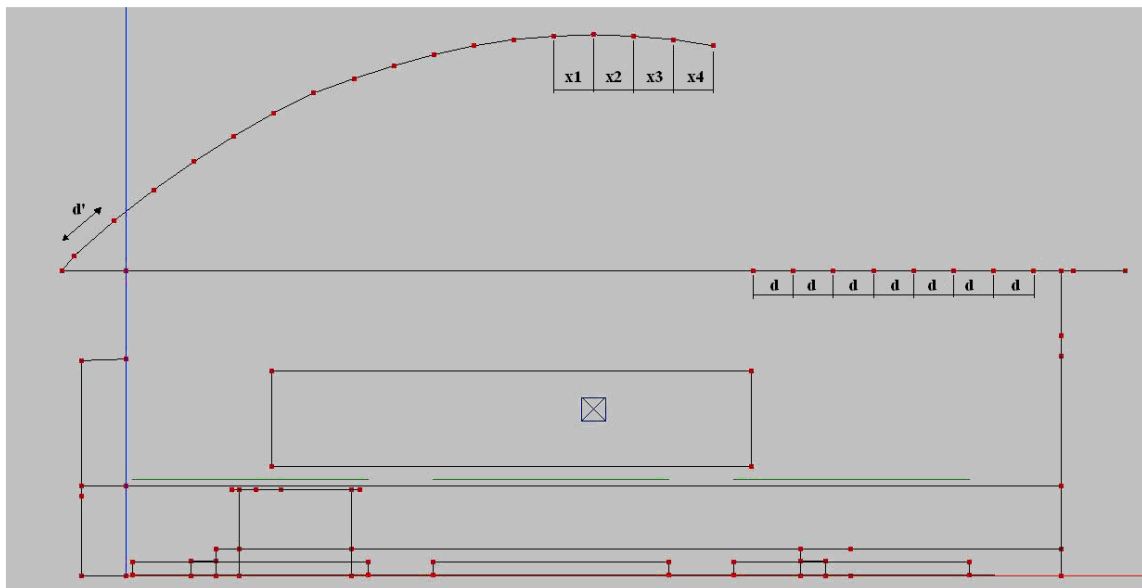


Figura 62 Detalle de construcción de la bóveda.

A consecuencia de esto, como vemos en la Figura 62, las distancias entre puntos de la bóveda ($x_1, x_2, x_3 \dots$) no es constante y, por tanto, el nivel de detalle final (lo identificaremos como d') habrá que calcularlo midiendo todas las distancias entre dos puntos consecutivos de los planos que conforman la bóveda y quedándonos con el mayor de ellos para, así, imponer la solución más restrictiva.

Sabiendo que, para un tamaño de la irregularidad aproximadamente igual a la longitud de onda, la reflexión especular pasa a ser reflexión difusa (o *scattering*) (véase Figura 6), vamos a emplear este criterio para fijar el valor de la distancia máxima (d_{\max}) entre dos puntos consecutivos que conforman la bóveda (véase Figura 62), suponiendo que d_{\max} es precisamente el tamaño de la irregularidad. Concretamente, vamos a imponer que d_{\max} sea dos veces menor que la longitud de onda correspondiente a 2000 Hz, que es la frecuencia más alta con mayor contribución a la inteligibilidad de la palabra, para así garantizar una reflexión especular en todo el rango de frecuencias hasta los 2000 Hz. Matemáticamente podemos expresar el criterio de nivel de detalle del siguiente modo:

$$2 \cdot d_{\max} = \lambda_{f_{\max}} = \frac{c}{f_{2000\text{Hz}}}, \quad (5.1)$$

siendo $c=344 \text{ m/s}$ la velocidad de propagación del sonido.

De este modo, la distancia máxima no debería ser mayor de;

$$d_{\max} = \frac{344 \text{ m/s}}{2 \cdot 2000 \text{ Hz}} = 0,086 \text{ m}. \quad (5.2)$$

Para este fin, se ha desarrollado una pequeña aplicación con Matlab que nos calcula, a partir de un vector de tamaño igual al número de superficies planas para modelar el techo que contiene la distancia entre cada dos puntos consecutivos, la mayor de todas las distancias (véase Figura 62), la cual será la que fijemos como nivel de detalle final d' .

Para definir el nivel de detalle a usar se han realizado diversas pruebas aumentando progresivamente dicho nivel.

I- Experimento I

Los materiales usados para las caras de todos los modelos son exactamente los mismos, para obtener una mayor uniformidad, las cuales se detallan a continuación:

- Paredes: CCL BRICK (ladrillos de arcilla comprimida)
- Zócalo: WOOD GRID1 (rejilla de madera)
- Suelo: MARBLE (mármol)
- Puertas y ventanas: WINDOW SP (panel sencillo de cristal)
- Techo y mesa: WOOFER HW (Suelo de madera)
- Pizarra: UNGL BRICK (ladrillo sin esmaltar)

En este primer experimento, el nivel de detalle inicial es de $d=1 \text{ m}$ para todas las longitudes del aula como se aprecia en la Figura 63.

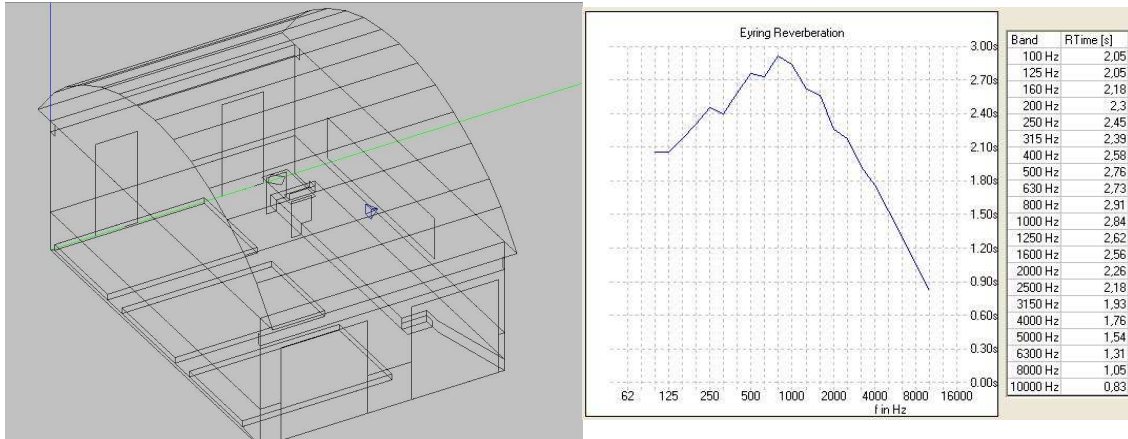


Figura 63 Aula para el Experimento I y tiempo de reverberación.

Calculando con el programa de Matlab antes mencionado obtenemos un nivel de detalle final de $d'=1,3014$ m, lo cual indica que es mayor que d_{\max} , con una resolución en frecuencia hasta:

$$f_{\max} = \frac{344m/s}{2 \cdot 1,3014m} = 132Hz < 2000Hz. \quad (5.3)$$

A primera vista, resulta evidente que con esta resolución los valores obtenidos no serán los más recomendables.

II - Experimento II

En este segundo experimento, representado en la Figura 64, el nivel de detalle inicial es $d=0,5$ m, pero el resto de parámetros son exactamente idénticos a los del Experimento I.

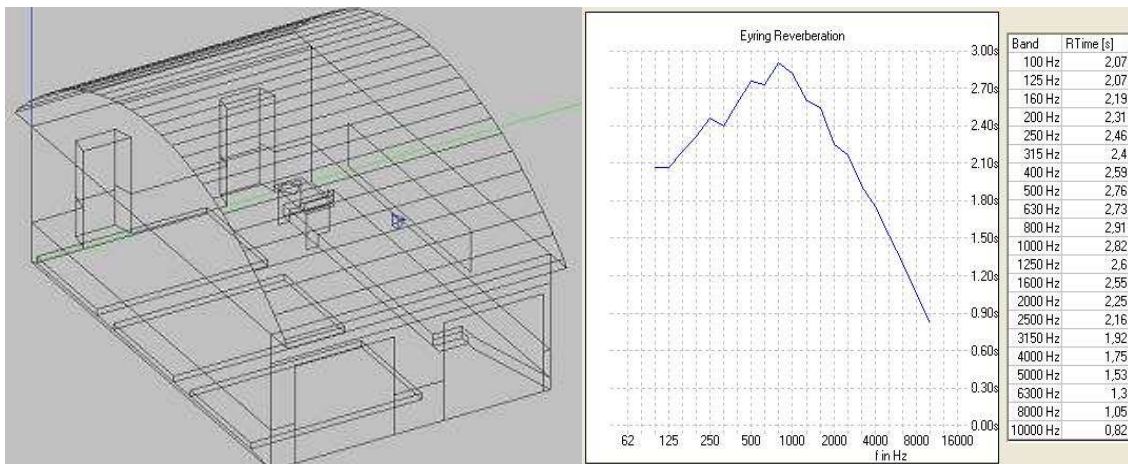


Figura 64 Aula para el Experimento II y tiempo de reverberación.

Como vemos, el nivel de detalle final es de $d'=0,666$ m, que es también mayor que d_{\max} , por lo que la resolución máxima en frecuencia es:

$$f_{\max} = \frac{344m/s}{2 \cdot 0,666m} = 258Hz < 2000Hz. \quad (5.4)$$

III - Experimento III

Para este tercer experimento fijaremos una resolución inicial de $d=0,3$ m, lo cual hace que el nivel de detalle de la bóveda sea mayor (Figura 65) a simple vista.

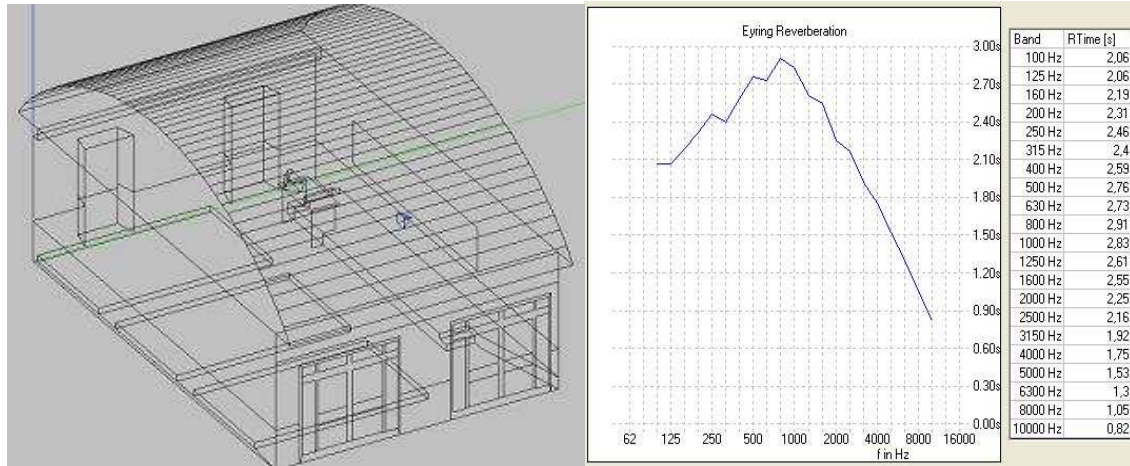


Figura 65 Aula para el Experimento III y tiempo de reverberación.

De este modo, el nivel de detalle final obtenido a partir de Matlab es $d'=0,4841$ m, por lo que en frecuencia tendremos una resolución máxima de:

$$f_{\max} = \frac{344m/s}{2 \cdot 0,4841m} = 355Hz < 2000Hz. \quad (5.5)$$

IV - Experimento IV

Finalmente, construimos la bóveda con un nivel de detalle inicial $d=0,1$ m (Figura 66). En este quinto experimento el ancho máximo de las superficies planas es $d'=0,1769$ m y, por tanto, la resolución máxima en frecuencia de:

$$f_{\max} = \frac{344m/s}{2 \cdot 0,1769m} = 972Hz < 2000Hz. \quad (5.6)$$

En principio, estamos aún por encima del valor teórico d_{\max} que calculamos al principio de este apartado. Sin embargo, como podemos observar en la Tabla 9, un nivel de detalle mayor, además de aumentar notablemente la cantidad de puntos a introducir en EASE para construir la bóveda, no nos proporciona unos resultados más fiables, ya que por debajo de un nivel de detalle inicial de $d=0,5$ m (Experimento II) los resultados de T, SPL, C_{50} y ALCons% apenas varían. Por lo tanto, a la vista de estos experimentos podemos considerar que un nivel de detalle inicial de $d=0,1$ m es más que suficiente para conseguir unos resultados más que satisfactorios con un coste computacional razonable.

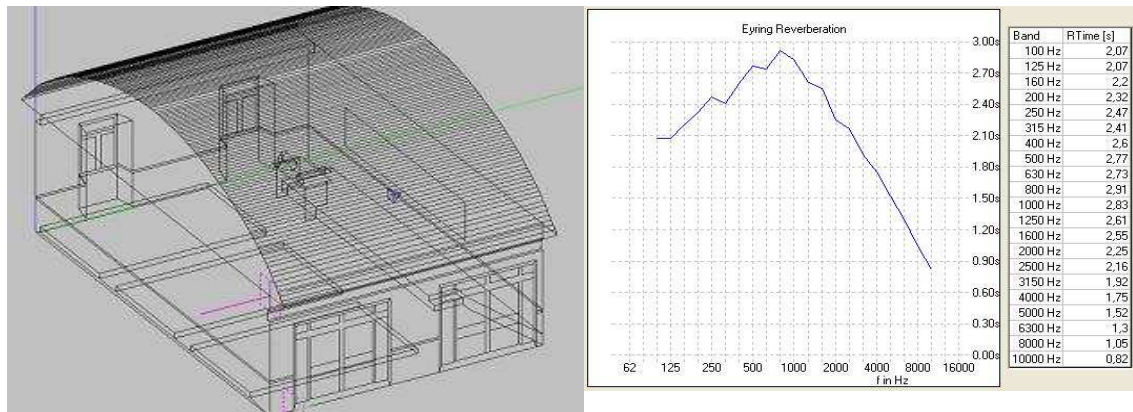


Figura 66 Aula para el Experimento IV y tiempo de reverberación.

Banda [Hz]	Experimento I				Experimento II				Experimento III				Experimento IV			
	T [s]	SPL [dB]	C ₅₀ [dB]	ALCon s%	T [s]	SPL [dB]	C ₅₀ [dB]	ALCon s%	T [s]	SPL [dB]	C ₅₀ [dB]	ALCon s%	T [s]	SPL [dB]	C ₅₀ [dB]	ALCon s%
100	2,05	56,2	-3,8		2,07	56,2	-3,9		2,06	56,2	-3,9		2,07	56,3	-3,9	
125	2,05	56,2	-3,8		2,07	56,2	-3,9		2,06	56,2	-3,9		2,07	56,3	-3,9	
160	2,18	59,4	-4,1		2,19	59,4	-4,2		2,19	59,4	-4,1		2,20	59,4	-4,2	
200	2,30	62,0	-4,4		2,31	62,0	-4,4		2,31	62,0	-4,4		2,32	62,0	-4,4	
250	2,45	64,6	-4,7		2,46	64,6	-4,7		2,46	64,6	-4,7		2,47	64,7	-4,7	
315	2,39	66,6	-4,5		2,40	66,6	-4,6		2,40	66,6	-4,6		2,41	66,6	-4,6	
400	2,58	69,6	-4,9		2,59	69,5	-4,9		2,59	69,5	-4,9		2,60	69,5	-4,9	
500	2,76	71,9	-5,2	21,03	2,76	71,9	-5,2	21,01	2,76	71,9	-5,2	21,02	2,77	71,9	-5,2	21,09
630	2,73	71,9	-5,2		2,73	71,9	-5,2		2,73	71,9	-5,2		2,73	71,9	-5,2	
800	2,91	72,1	-5,5		2,91	72,1	-5,5		2,91	72,1	-5,5		2,91	72,1	-5,5	
1000	2,84	72,2	-5,4	22,19	2,82	72,1	-5,4	22,05	2,83	72,1	-5,4	22,06	2,83	72,1	-5,4	22,09
1250	2,62	70,0	-4,9		2,60	70,0	-4,9		2,61	70,0	-4,9		2,61	70,0	-4,9	
1600	2,56	68,0	-4,6		2,55	68,0	-4,6		2,55	68,0	-4,6		2,55	68,0	-4,6	
2000	2,26	65,9	-3,8	16,16	2,25	65,9	-3,8	16,07	2,25	65,9	-3,8	16,07	2,25	65,8	-3,8	16,08
2500	2,18	62,3	-3,6		2,16	62,3	-3,6		2,16	62,3	-3,6		2,16	62,2	-3,6	
3150	1,93	58,6	-3,0		1,92	58,6	-3,0		1,92	58,6	-3,0		1,92	58,6	-3,0	
4000	1,76	55,6	-2,6		1,75	55,6	-2,5		1,75	55,6	-2,5		1,75	55,5	-2,5	
5000	1,54	51,6	-1,7		1,53	51,5	-1,6		1,53	51,5	-1,6		1,52	51,5	-1,6	
6300	1,31	47,6	-0,6		1,30	47,6	-0,6		1,30	47,6	-0,6		1,30	47,5	-0,6	
8000	1,05	43,5	0,7		1,05	43,4	0,7		1,05	43,4	0,7		1,05	43,5	0,7	
10000	0,83	42,6	2,2		0,82	42,5	2,2		0,82	42,5	2,2		0,82	42,5	2,2	

Tabla 9 Comparativa de SPL total, C₅₀ y ALCons% para experimentos I, II, III y IV.

5.2.2. Aula pequeña

En este apartado se explicará qué proceso se ha seguido para la creación del modelo en EASE del aula pequeña.

El principal problema a la hora de realizar dicho modelo fue sin duda el techo de las aulas. Dado que EASE sólo permite representar caras planas hubo que aproximar el techo abovedado con un número determinado de planos, para lo cual se hizo el estudio del nivel de detalle explicado en el apartado anterior.

Por otro lado, el proceso de diseño del recinto se llevó a cabo a partir de las medidas de la geometría de la sala tomadas “in situ”, con la ayuda de un medidor digital. A continuación, se introdujeron estos resultados en el módulo de edición de programa.

Cabe destacar que se ha llegado al modelo final a partir de diversas fases intermedias aumentando, a cada vez, el nivel de complejidad del mismo. Este procedimiento es debido a que EASE a veces presenta problemas de solapamientos de caras o agujeros en el recinto, impidiendo el cálculo de los diferentes parámetros acústicos. De esta manera, fue mucho más fácil construir el modelo final, ya que podíamos comprobar, cada vez que introducíamos una cara nueva, que no había ningún problema de este tipo.

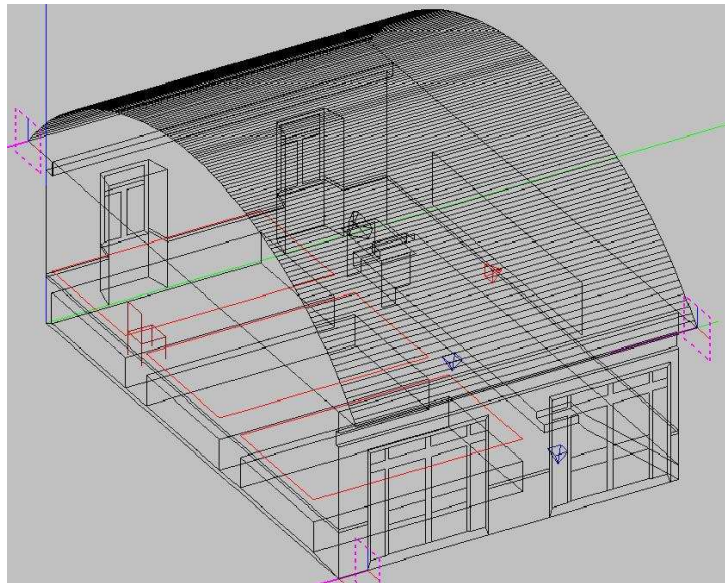


Figura 67 Aula pequeña en módulo de edición.

Otro criterio de diseño importante fue la manera de simular los pupitres del aula. Por simplicidad, en lugar introducir todos los puntos y superficies que constituyen las tres bancadas de pupitres, el espacio ocupado por las mismas se modeló como tres elementos cúbicos, uno por bancada, cubiertos por el mismo material absorbente que el de los pupitres en su cara visible, es decir, la que “ve” la onda (véase Figura 67). Además, se fijó la altura de los cubos de forma que la superficie total ocupada más o menos coincidiera con la superficie real de los pupitres.

5.2.3. Aula Grande.

En este tipo de aula, reflejada en la Figura 68, una de las diferencias principales es, sin duda, el volumen. Al presentar un volumen mayor hay una puerta y una ventana adicionales con respecto al aula pequeña, por lo que tendremos dos zonas reflectantes más.

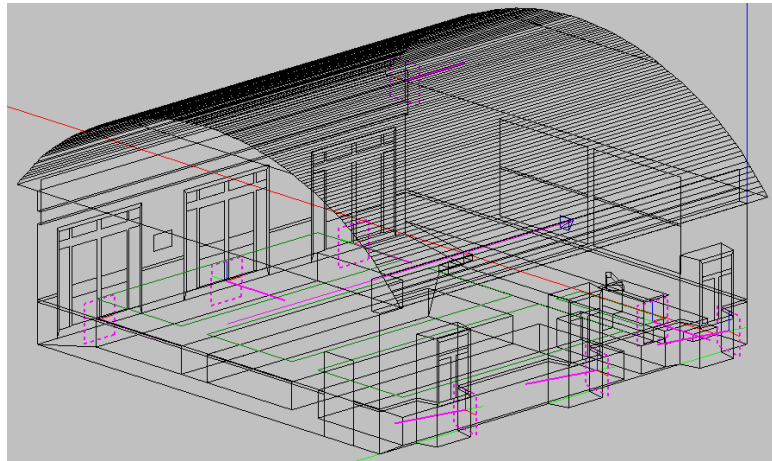


Figura 68 Aula grande en módulo de edición.

Lógicamente, a mayor volumen de la sala mayor es el tiempo de reverberación, máxime si el conjunto de materiales son iguales que en el aula pequeña pero, como ya hemos dicho, en este aula se instalaron placas de un material absorbente en la zona del semicírculo entre la pared y el techo, por lo que el tiempo de reverberación no es, en principio, tan elevado como cabría esperar.

El proceso de creación de este aula fue muy similar al del anterior, pero se contaba ya con la ventaja de estar mucho más familiarizados con el programa, por lo que el número de modelos intermedios fue mucho menor.

5.3. Ajuste del modelo.

En este apartado, además de comentar los diferentes materiales que se usaron en la realización del modelo, describiremos el proceso llevado a cabo para el ajuste del modelo, un paso totalmente necesario para conseguir que la simulación se ajuste lo más posible a la realidad.

5.3.1. Materiales iniciales.

En un primer momento, para hacer las primeras pruebas, se optó por usar materiales de la base de datos de EASE, escogiendo los que, en principio, más se aproximaban a los reales pero, una vez se quiso obtener resultados fiables, se buscó en numerosas bases de datos materiales más adecuados y se introdujeron de la manera explicada en el Apartado 5.1.5. La distribución de los materiales es la que vemos reflejada en la Figura 69 para el caso concreto del aula grande.

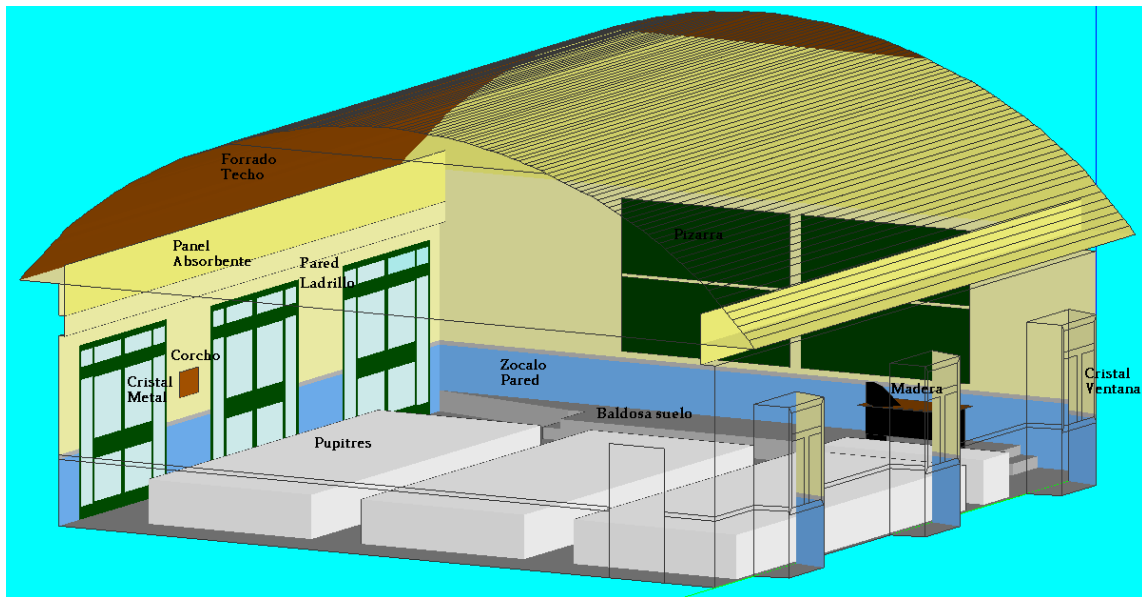


Figura 69 Distribución de materiales en el aula grande.

Y la relación de materiales con sus respectivos coeficientes de absorción se describe a continuación.

I – Baldosa suelo

Este material está distribuido por todo el suelo de la sala, incluido el estrado, y se trata de baldosas de mármol.

Su coeficiente de absorción en función de la frecuencia es el que se ve en la Figura 70. Además, para todos los materiales que se encuentran en superficies planas tenemos un coeficiente de *scattering* de 0.1 para cada una de las bandas de tercio de octava.

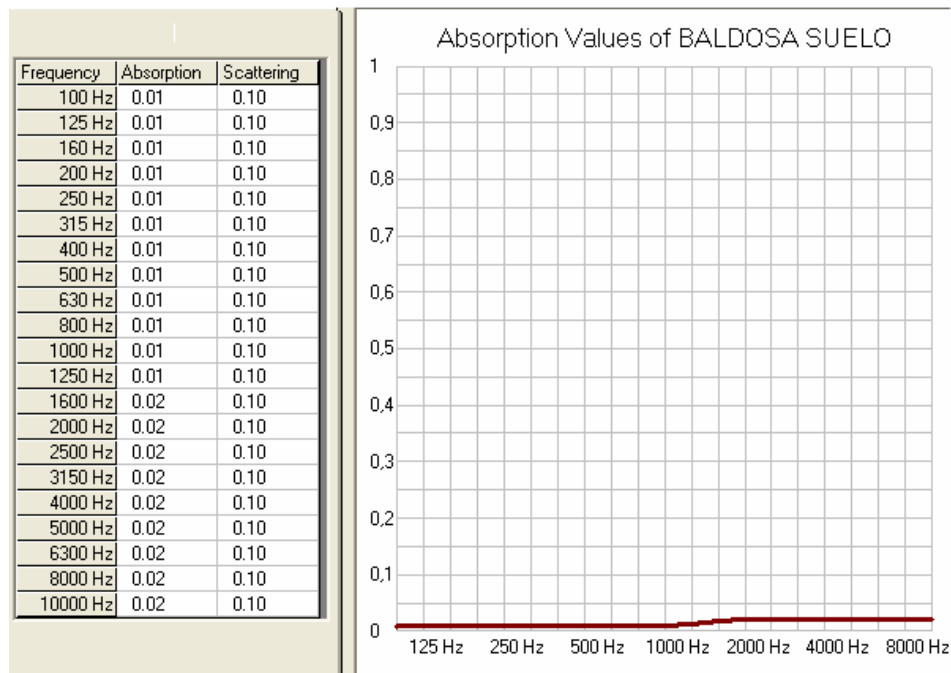


Figura 70 Coeficientes de absorción y de *scattering* de las baldosas del suelo.

II – Cristal ventana

Este material, como su propio nombre indica se usa para las ventanas, pero no solo para los cristales. Se decidió usar también para el marco de las ventanas ya que, a pesar de ser materiales diferentes, el marco es tan pequeño que la inclusión de otro material apenas provocaría cambios.

Como vemos en la Figura 71, el nivel de absorción es mucho más elevado a baja frecuencia mientras que el *scattering*, al ser ambas superficies planas, permanece igual.

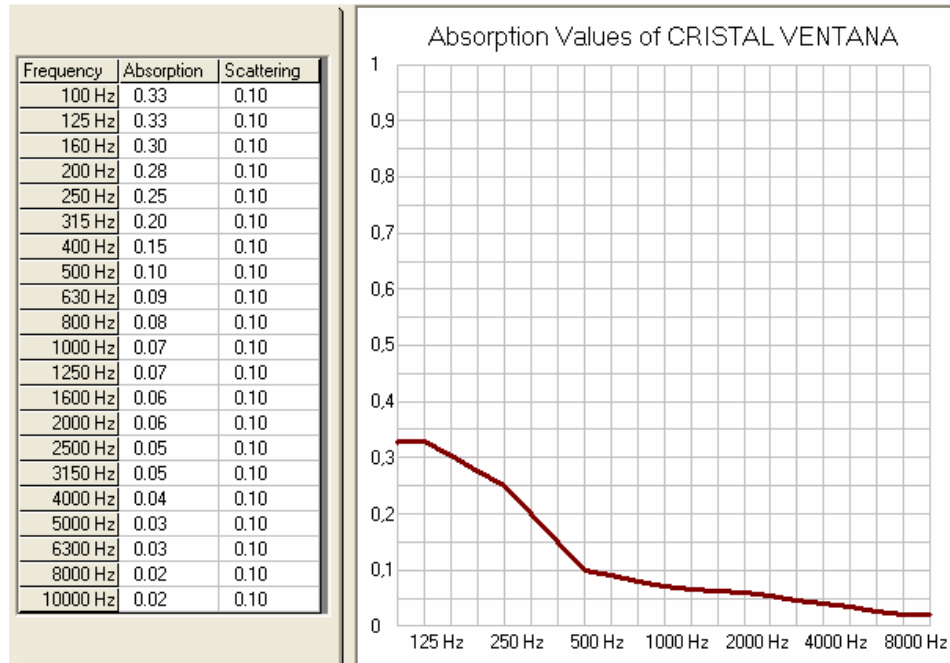


Figura 71 Coeficientes de absorción y de *scattering* del cristal de las ventanas.

III – Cristal-Metal de las puertas

Este material es el usado para las puertas metálicas con cristal. Surge de la unión de ambos materiales y se decidió hacer de esta manera simplemente por pragmatismo.

Los coeficientes de absorción y *scattering* se pueden ver reflejados en la Figura 72.

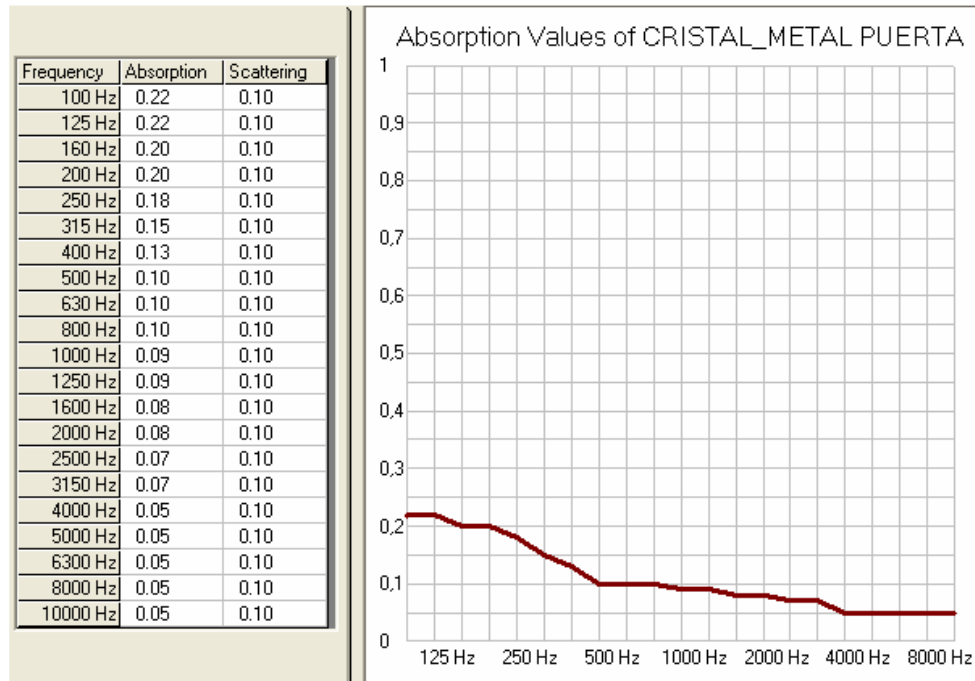


Figura 72 Coeficientes de absorción y de *scattering* del cristal-metal de las puertas.

IV – Forrado techo

Este material se introdujo como solución a las placas de madera colocadas en el techo de ambas aulas y en el semicírculo entre la pared y el techo.

Los coeficientes de absorción y *scattering* pueden verse reflejados en la Figura 73.

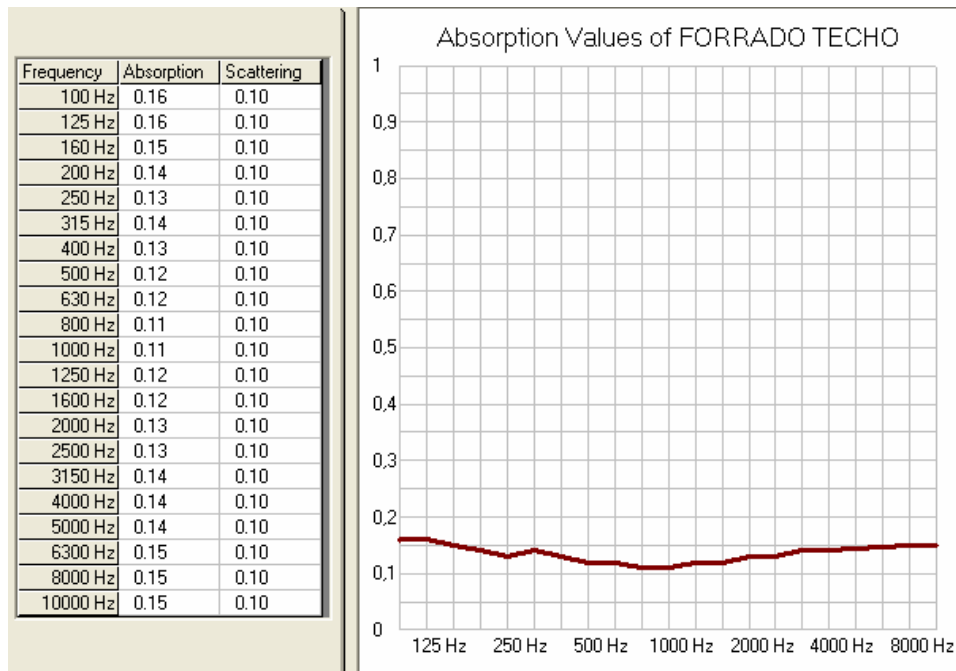


Figura 73 Coeficientes de absorción y de *scattering* del forrado del techo.

V – Madera

Como solución a la mesa de madera del profesor se introdujo este material. Debido al desconocimiento del tipo de madera, buscamos en diversas bases de datos e introdujimos el material cuyos coeficientes de absorción y *scattering* son los mostrados en la Figura 74.

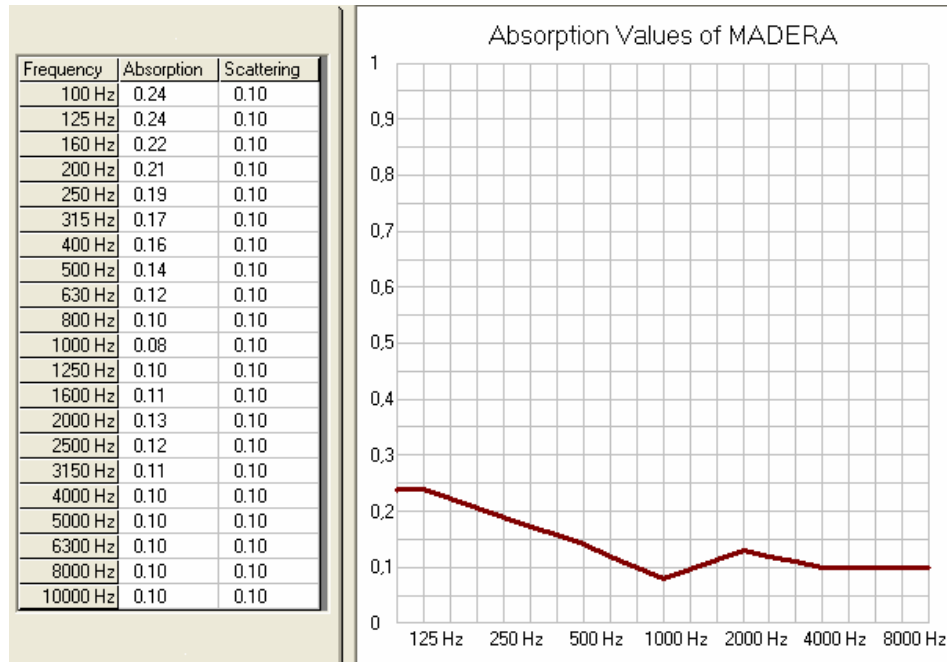


Figura 74 Coeficientes de absorción y de *scattering* de la mesa del profesor.

VI - Pared

Este material es uno de los que más superficie efectiva ocupa en el recinto. Se trata de un muro de ladrillo con un enlucido de yeso. Como vemos en la Figura 75 se trata de un material muy poco absorbente.

En la Figura 75 podemos ver los valores de absorción y *scattering* para cada banda de tercio de octava.

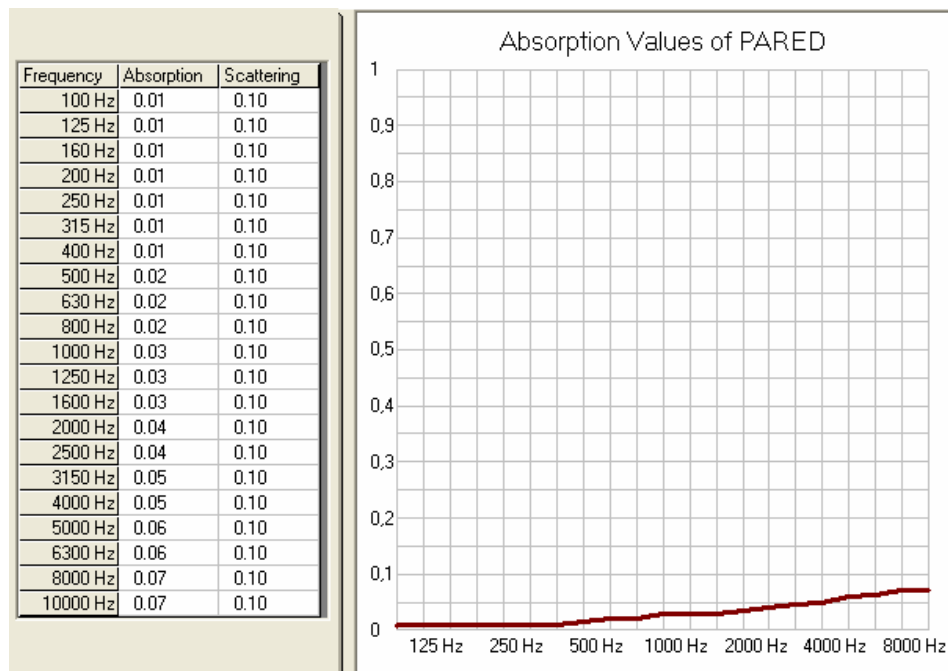


Figura 75 Coeficientes de absorción y de *scattering* de la pared.

VII – Pizarra

Este material, debido a que es muy común en este tipo de recintos, se extrajo directamente de una base de datos. Como podemos ver en la Figura 76 poco poroso y muy reflectante.

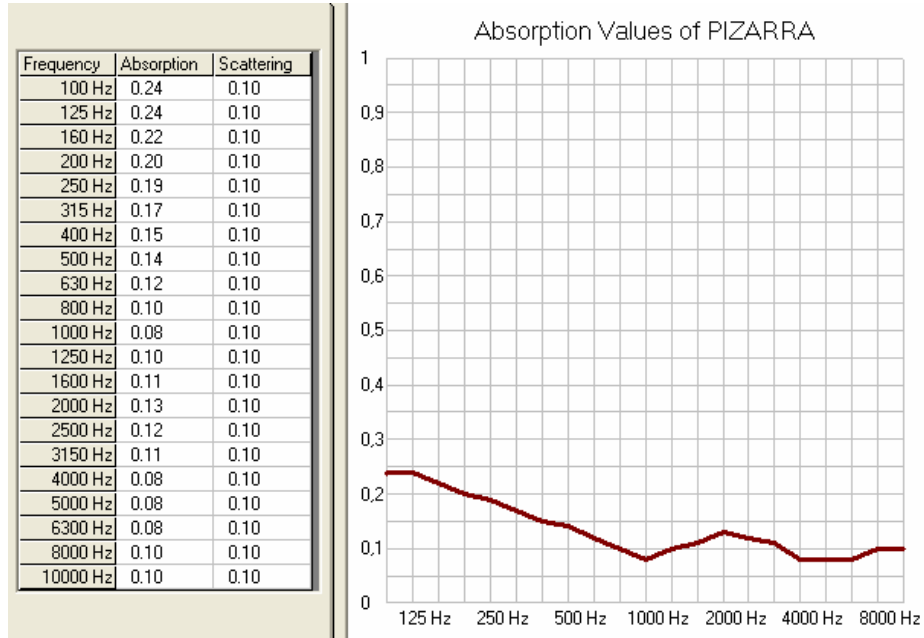


Figura 76 Coeficientes de absorción y de *scattering* de la pizarra.

VIII – Pupitres

Dado que la mesa de los pupitres es de madera y las sillas de metal, se ha buscado un material para los pupitres que combine los tipos de absorción.

Como podemos observar en la Figura 77, la absorción del material es bastante reflectante y el grado de difusión mayor que el de resto de materiales debido a las numerosas cavidades y recovecos formados por las sillas y las mesas.

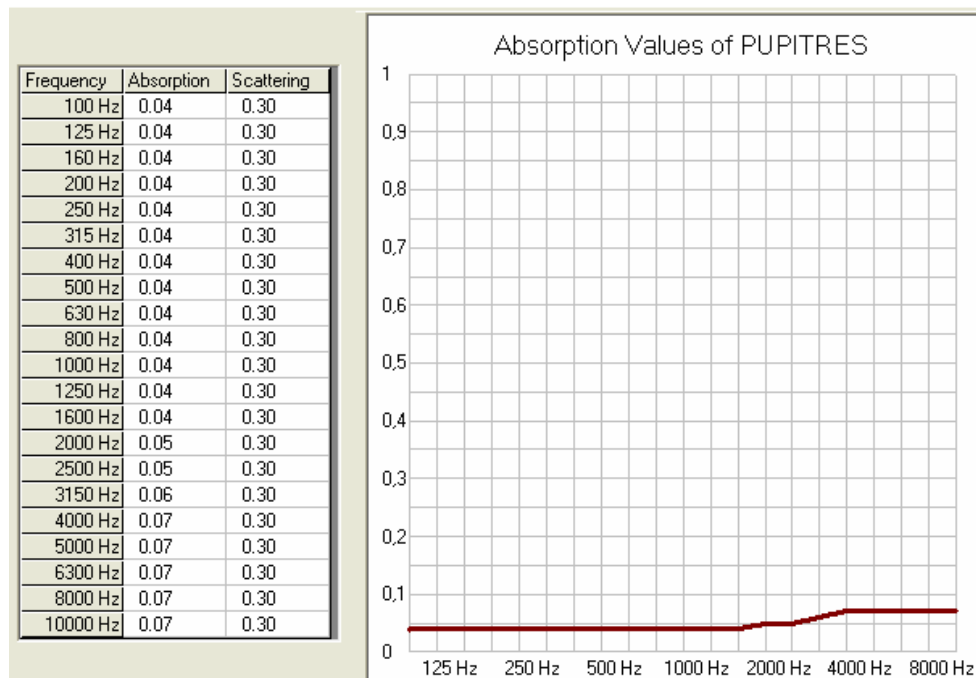


Figura 77 Coeficientes de absorción y de *scattering* de los pupitres.

IX – Zócalo pared

Este material se encuentra colocado sobre las paredes a lo largo de todo el perímetro del aula. A simple vista es un material plástico, pero después de mucho investigar se consiguió dar con el material exacto, por lo que se optó por introducir un material poco absorbente y, en caso de que fuera necesario, cambiarlo a la hora del ajustar del modelo.

La Figura 78 ilustra los valores de absorción y *scattering* para cada banda de tercios de octava.

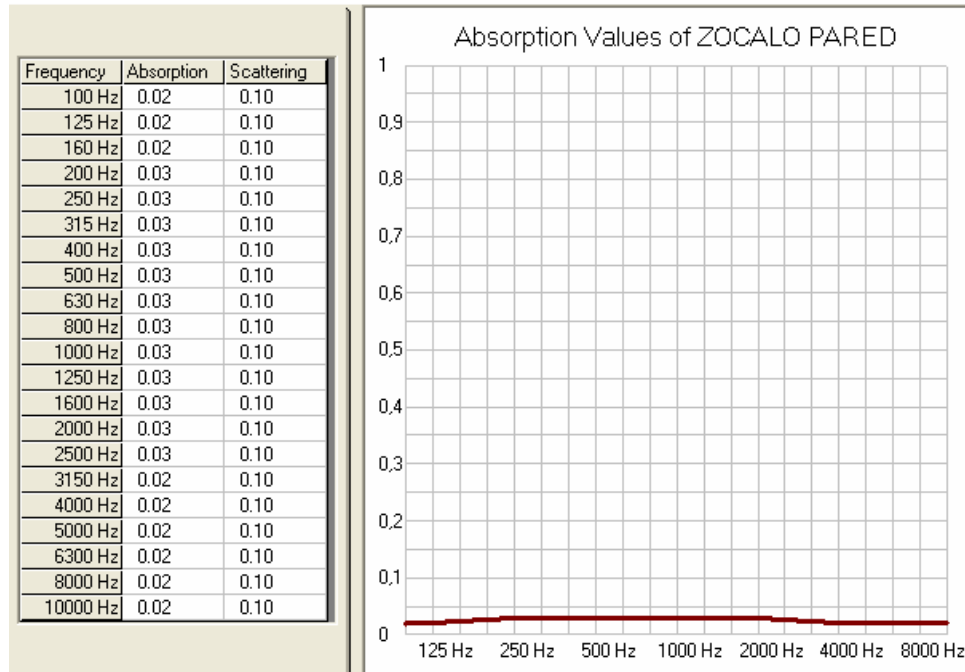


Figura 78 Coeficientes de absorción y de *scattering* del zócalo de la pared.

5.3.2. Cómo ajustar un modelo

Como ya se ha comentado el ajuste del modelo es uno de los pasos más importantes en un diseño acústico, ya que conseguimos, mediante las medidas tomadas “in situ”, que nuestro modelo se aproxime lo más posible a la realidad. Los parámetros que nos permitirán que esto suceda serán el ruido de fondo y el tiempo reverberación.

Idealmente un buen ajuste del modelo se debería llevar a cabo buscando las absorciones adecuadas del recinto tal que los tiempos de reverberación medidos “in situ” más o menos coincidieran con los tiempos de reverberación simulados en esos mismos puntos. No obstante, debido a que esta tarea puede resultar un tanto tediosa, podemos aprovechar el hecho de que el recinto es suficientemente difuso y que las medidas de T obtenidas presentan una incertidumbre baja para ajustar el modelo a partir de la teoría estadística, es decir, que el valor promedio de los tiempos de reverberación medidos “in situ” sea similar al estimado por algunas de las aproximaciones de T propuestas en dicha teoría.

Deberemos entonces introducir los datos del ruido de fondo y T promedio en EASE. Añadiremos los datos medidos del ruido de fondo a través de menú *Edit* del módulo de edición haciendo *click* sobre la opción *Room Data*, cuya ventana es como la de la Figura 79.

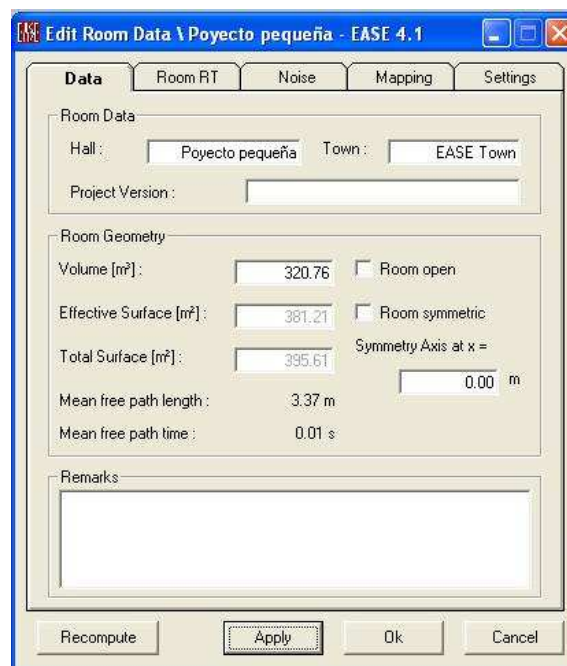


Figura 79 Ventana de *Room Data*.

A través de esta ventana, y accediendo a la pestaña *Noise*, podremos introducir todos los valores del ruido de fondo medido en tercios de octava. Es importante introducir estos valores ya que EASE los usa para determinar diversos parámetros de inteligibilidad por lo que, como ya hemos dicho, obtendremos valores más realistas.

El siguiente paso será conseguir que el tiempo de reverberación simulado, bien mediante Sabine (Ecuación 1.13) o bien mediante Eyring (Ecuación 1.14), se aproxime en la medida de lo posible al valor promedio real. Concretamente, en este proyecto

hemos seleccionado la aproximación de Eyring debido a que proporciona resultados fiables en un mayor rango de absorciones del recinto.

Asimismo, la herramienta que usaremos para el ajuste del modelo es la llamada *Optimize RT* del menú *Tools* que se encuentra en el módulo *Edit Project*, cuya ventana principal se puede ver en la Figura 80.

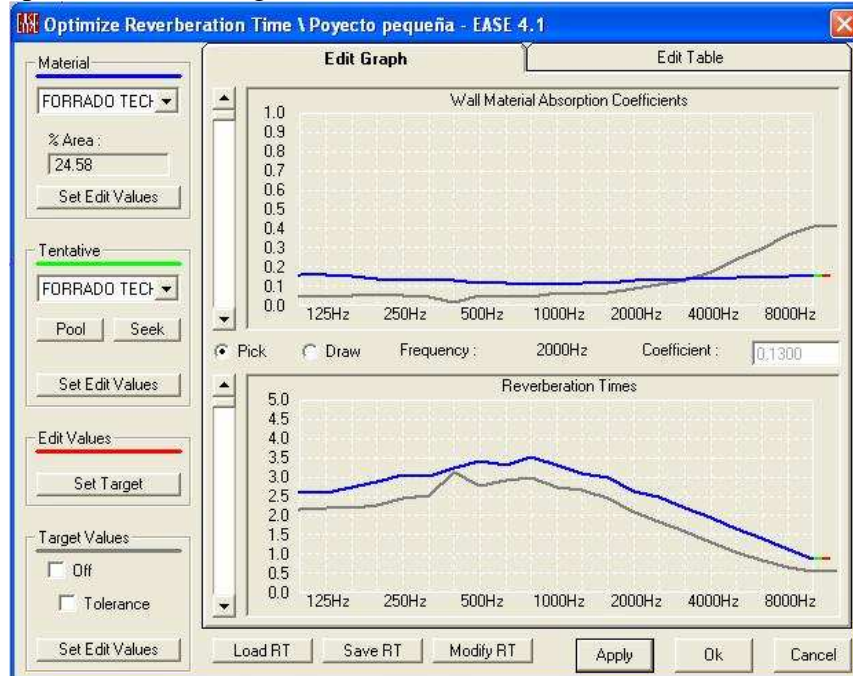


Figura 80 Ventana *Optimize RT*.

Con esta herramienta se podrán ver los valores de absorción de diferentes materiales, así como los tiempos de reverberación resultantes de cambiar dichos materiales. En la parte superior izquierda (*material*) podemos seleccionar qué material queremos sustituir para conseguir un tiempo de reverberación deseado. En la parte superior derecha nos muestran, en azul, la absorción de dicho material y en gris, la absorción que necesitaríamos para conseguir el T objetivo. Además, en la parte inferior derecha vemos una gráfica que representa el T que tenemos (azul) y el objetivo (gris).

El valor de T objetivo se introduce accediendo a la pestaña (parte superior derecha) *Edit Table* e introduciendo en la columna *Target Value* los valores medidos “in situ” del T en tercios de octava. Además, la herramienta nos proporciona la opción de guardar estos datos.

Una vez hecho esto seleccionaremos el material que queremos cambiar en la pestaña *Material* y, justo debajo de ésta, en la pestaña *Tentative* pulsando el botón *Seek*, nos proporciona el material con el cual conseguimos el tiempo de reverberación simulado más próximo al medido “in situ”.

Otra forma de conseguir el tiempo de reverberación objetivo es introduciendo los valores de T obtenidos “in situ” y creando un material nuevo con los coeficientes de absorción que *Optimize RT* proporciona para alcanzar la curva de T deseada. Esta es la opción que se ha usado en nuestro caso ya que con ella se consigue el tiempo de reverberación exacto medido previamente mediante las medidas “in situ”.

5.3.3. Materiales finales

I - Aulas pequeñas

En este caso, el material que se ha decidido modificar para conseguir los valores de T obtenidos en las medidas “in situ” es el *Forrado Techo*, dado que es el material que más superficie efectiva ocupa y, por tanto, el que más influye en la reverberación del recinto. A partir de los valores que *Optimize RT* proporciona se ha creado un nuevo material, cuyos coeficientes de absorción vemos en la Figura 81, al cual se ha dado el nombre de *Forrado Techo 2*. Asimismo, hemos introducido para este material un coeficiente de *scattering* de 0,1 en todas las bandas de frecuencia debido a su carácter reflectante.

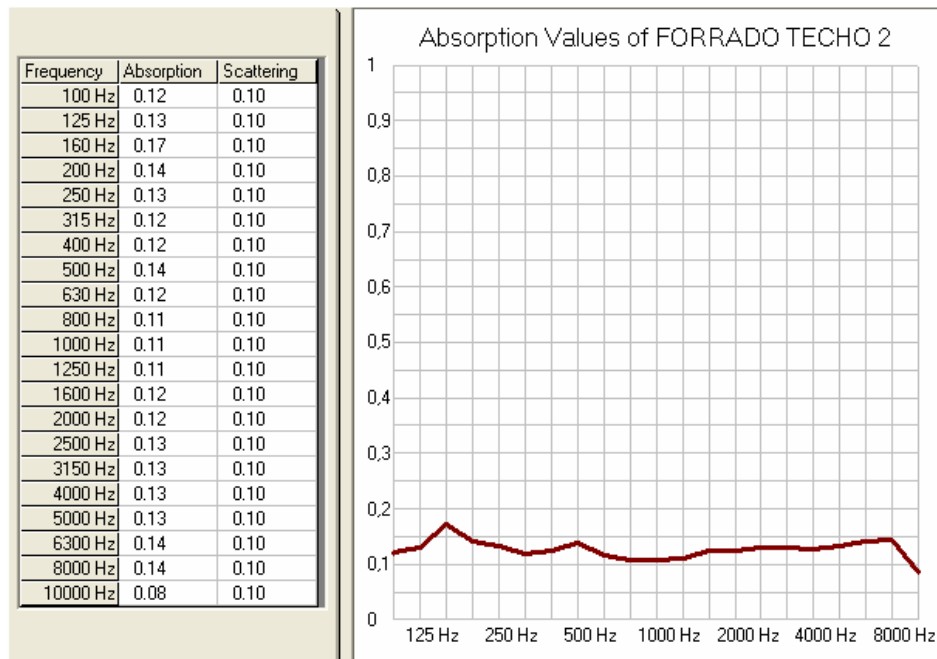


Figura 81 Coeficientes de absorción y de *scattering* del forrado final del Techo.

II- Aulas grandes

Con este aula se ha partido de la base de que ya se conoce el coeficiente de absorción exacto del forrado del techo, por lo que no se debería modificar este mismo material, ya que en ambas aulas ambos techos son iguales. Por tanto, se decidió que el material a modificar fuera la fibra mineral que reviste el semicírculo entre la pared y el techo y los laterales superiores de las paredes. Además, gracias a esta elección pudimos descubrir los coeficientes de absorción para este material, puesto que, a pesar de que a simple vista parezca algún tipo de fibra mineral como ya se ha dicho, no se sabía muy bien qué material exacto era y, de esta forma, se obtuvieron unos coeficientes de absorción razonablemente fiables para este material.

Los coeficientes de absorción y de *scattering* para este material de fibra mineral son los que vemos en la Figura 82.

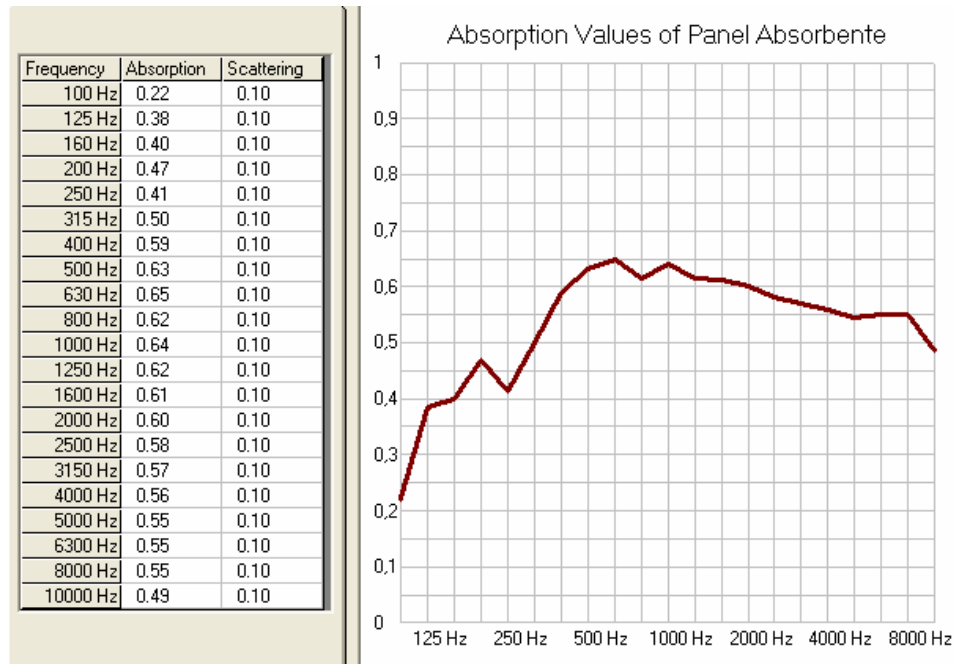


Figura 82 Coeficientes de absorción y de *scattering* del panel absorbente.

De este modo, se ha conseguido que los tiempos de reverberación de ambas aulas sean exactamente iguales a los medidos “in situ”. Por tanto, se puede decir perfectamente que el modelo se aproxima a la realidad en gran medida y cabe esperar unos resultados de simulación acústica fiables.

Los resultados de los mismos se presentan en el punto 5.5.

5.4 Estudio de concentraciones sonoras

Este apartado se centra en el estudio llevado a cabo acerca de las posibles concentraciones sonoras producidas implícitamente por la geometría del techo de las aulas.

Como se comentó en el punto IV del apartado 1.2.2, el hecho de tener un techo con forma abovedada puede producir concentraciones no deseadas en ciertas zonas del recinto.

En el caso que nos compete, la forma geométrica que envuelve al techo de las aulas es concretamente la de una elipse, tal y como se puede ver en la Figura 83, por lo que todos los rayos sonoros (líneas negras) que salgan de uno de los focos de la elipse acabarán pasando por el otro foco. Además, se cumple que la altura del recinto (h) es igual que el radio menor (r) de la elipse, por lo que, como podemos comprobar en la Figura 8 a), las concentraciones que puedan surgir serán más críticas

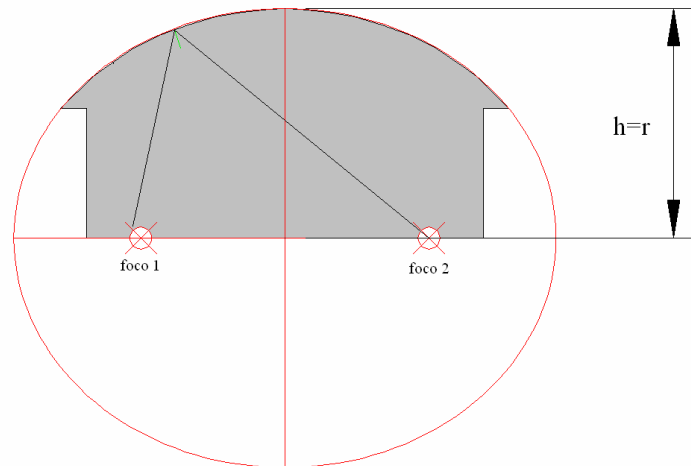


Figura 83 Elipse que envuelve al techo de las aulas y focos de la misma.

Para abordar el estudio de las concentraciones sonoras se utilizó el módulo *Ray Tracing* de EASE, el cual dibuja la trayectoria de los rayos sonoros hasta un orden determinado emitidos desde una fuente situada en un punto concreto del recinto. Para ello se emplazó un altavoz *MAN LOUD* (voz de un hombre hablando alto) en el centro del estrado del aula y se estudiaron las reflexiones (hasta orden 3) producidas por la acción exclusiva del techo del aula. El efecto de este experimento podemos verlo en la Figura 84.

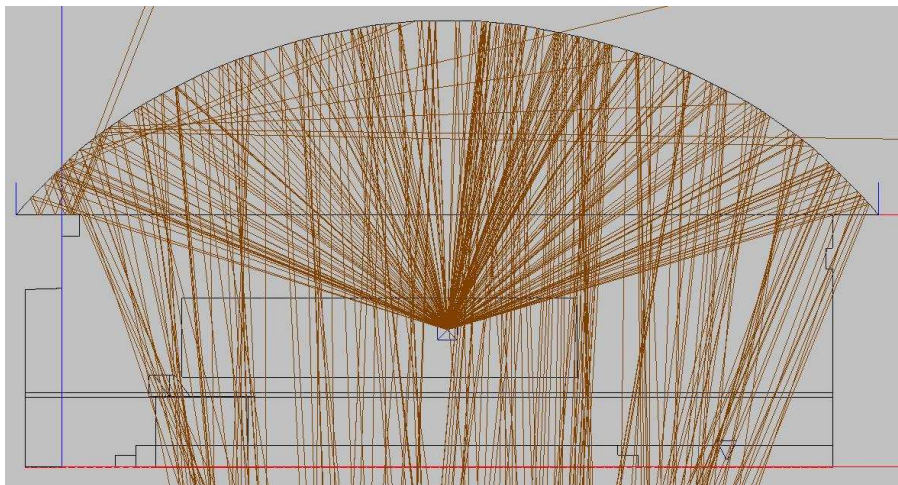


Figura 84 Concentraciones sonoras provocadas por la bóveda con la fuente en el centro del aula.

Como podemos observar, al emitir sonido desde el centro de la tarima, la bóveda provoca que la mayoría de reflexiones procedentes de ésta se localicen en una región central del aula que cubre la mayoría de los pupitres, por lo que quedan dos zonas a los lados de la misma a la que no llegarían reflexiones correspondientes al choque con la bóveda. No obstante, este efecto puede que no se perciba con claridad, ya que la influencia del sonido directo procedente del orador y las primeras reflexiones producidas por el choque con el resto de superficies límite cubren esas zonas no alcanzadas por los rayos procedentes del techo.

Por otro lado, y como segundo experimento, se estudiaron las posibles concentraciones sonoras generadas cuando la fuente se emplaza en uno de los focos de la elipse. Como vemos en la Figura 83, ambos focos se sitúan justo en el suelo del aula y

en posiciones simétricas con respecto al eje central de la vista en alzado del aula. El efecto producido se puede observar en la Figura 85 que se muestra a continuación.

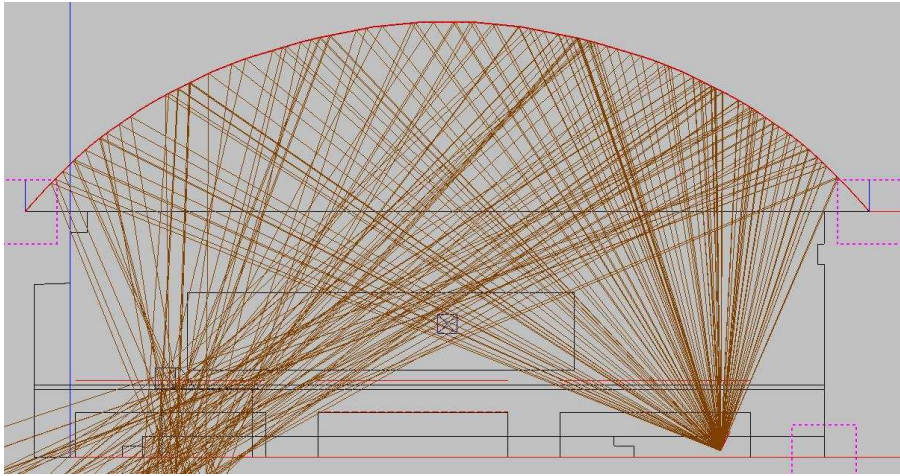


Figura 85 Concentraciones sonoras provocadas por la bóveda con la fuente en el foco de la elipse.

Como vemos en la figura, se produce una clara concentración sonora en torno a un foco de la elipse cuando los rayos emanan del otro foco (de hecho la concentración se centraría justo en el punto focal si la curvatura del techo fuese perfecta, es decir, no estuviese modelada mediante superficies planas), por lo que en una zona del aula habría una concentración clara de energía sonora. A pesar de esto, lo más probable es que esta concentración no afecte en absoluto al confort acústico dentro del aula debido a que es improbable que el orador se sitúe en uno de los focos. Además, como los focos se encuentran justo debajo de las áreas de audiencia, la estructura irregular de los pupitres actuaría de difusor de energía, reduciendo en gran medida la concentración sonora.

5.5. Resultados de la simulación

Tras ajustar los dos modelos de aula pequeña y aula grande, se comenzaron a calcular, mediante los resultados obtenidos en la simulación, las magnitudes acústicas de interés.

Lo primero fue conseguir el T que se había medido “in situ” para, a continuación, introducir los valores de ruido de fondo de cada una de las aulas. Ambos parámetros influyen notablemente en la inteligibilidad de la palabra.

A continuación, ejecutando el módulo de EASE *Area Mapping*, y mediante el mapeo *Standar*, se obtuvieron los valores de C_{50} (Apartado 5.5.5), ALCons% (Apartado 5.5.7) y RASTI (Apartado 5.5.8).

Finalmente, se calcularon los valores de Brillo y Calidez (Apartado 5.5.3) de la forma descrita en el Apartado 1.4.3 y los valores de EDT (Apartado 5.5.4) y Definición (Apartado 5.5.6) mediante la herramienta AURA.

Con todo esto, los resultados obtenidos son los que se presentan en los siguientes apartados.

5.5.1. Tiempo de reverberación

Como ya se ha dicho, el T obtenido es exactamente igual que el medido “in situ”:

Banda [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	Tmid[s]
T Aulas Pequeñas [s]	2,47	2,39	1,99	2,30	2,44	2,71	2,68	2,49	2,79	2,93	2,85	2,73	2,48	2,32	2,16	2,00	1,83	1,57	1,32	1,06	0,93	2,67
T Aulas Grandes [s]	2,21	1,75	1,56	1,56	1,73	1,63	1,46	1,35	1,38	1,45	1,39	1,40	1,35	1,31	1,28	1,22	1,18	1,06	0,96	0,82	0,75	1,37

Tabla 10 Tiempos de reverberación de aulas grandes y pequeñas.

Dado que el T_{mid} recomendado para este tipo de recintos se encuentra en torno a los 0.8 s, como se puede comprobar en la Figura 21, podemos ver cómo los tiempos de reverberación obtenidos en las aulas distan bastante de este objetivo, por lo que será totalmente necesario plantear un acondicionamiento acústico que mejore estas condiciones desfavorables.

5.5.2. Ruido de fondo.

El ruido de fondo medido en una cada uno de los dos tipos de aula, y que supondremos igual para el resto de aulas del mismo tipo, es el que podemos ver en la Tabla 11.

Banda [Hz]	Aulas Pequeñas [dB]	idem en octavas	Aulas Grandes [dB]	idem en octavas
100	46,6		43,9	
125	45,6	50,2	39,6	45,7
160	43,4		35,4	
200	40,6		34,8	
250	49,8	53,8	35,5	41,0
315	51,2		37,8	
400	41,9		29,3	
500	40,4	45,3	28,3	34,4
630	38,9		30,8	
800	36,3		28,5	
1000	36,1	40,9	29,2	34,1
1250	36,1		30,2	
1600	36,2		30,2	
2000	34,4	39,4	29,9	34,8
2500	32,7		29,9	
3150	31,3		30,0	
4000	31,0	36,0	31,2	35,7
5000	31,4		31,5	
6300	32,2		32,2	
8000	33,1	37,9	33,0	37,9
10000	34,0		34,0	
		NC45		NC40

Tabla 11 Ruido de fondo aulas grandes y pequeñas.

Como vemos en los resultados de ruido de fondo de la Tabla 11, las aulas no cumplen con el criterio de ruido NC, que establece que el ruido de fondo de una sala de conferencias o aula debe situarse por debajo de las curvas NC20 o NC30. Los valores obtenidos están muy por encima de la recomendación, seguramente debido al nulo aislamiento de las puertas de cada una de las aulas y al hecho de que éstas se comunican con un pasillo principal de la planta por donde transita la gente.

Estos niveles elevados de ruido de fondo podrían repercutir negativamente en la inteligibilidad de la palabra, por lo que son dignos de tener en cuenta.

5.5.3. Brillo y calidez.

Estos parámetros necesitan de un cálculo previo mediante las Ecuaciones (1.39) y (1.40) y se pueden ver los resultados en la Tabla 12.

	BRILLO (Br)	CALIDEZ (BR)
Aulas Pequeñas	0,78	0,90
ÓPTIMO	$\geq 0,80$	$0,90 \leq BR \leq 1,30$
Aulas Grandes	0,91	1,27

Tabla 12 Resultados de Brillo y Calidez.

Como podemos observar las aulas pequeñas se sitúan en el límite inferior de los valores recomendados, posiblemente debido al elevado tiempo de reverberación que presentan, mientras que las aulas grandes se encuentran dentro de los márgenes de brillo y calidez recomendados.

5.5.4. Tiempo de caída inicial

Los resultados del tiempo de caída inicial (EDT) calculados por EASE se pueden ver en la Tabla 13.

Banda [Hz]	EDT Aulas Pequeñas [s]			EDT Aulas Grandes [s]		
	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo
100	2,47	2,90	2,20	2,39	2,65	2,13
125	2,39	2,61	2,13	1,99	2,20	1,79
160	2,01	2,21	1,79	1,80	2,03	1,58
200	2,30	2,54	2,03	1,83	2,04	1,61
250	2,42	2,68	2,15	1,99	2,21	1,75
315	2,63	2,85	2,38	1,92	2,12	1,71
400	2,59	2,79	2,34	1,76	1,94	1,59
500	2,42	2,64	2,21	1,68	1,80	1,54
630	2,65	3,13	2,42	1,70	1,84	1,56
800	2,74	2,93	2,55	1,76	1,95	1,60
1000	2,66	2,85	2,46	1,71	1,88	1,54
1250	2,55	2,93	2,39	1,68	1,83	1,54
1600	2,36	2,54	2,20	1,62	1,79	1,47
2000	2,21	2,39	2,04	1,54	1,67	1,43
2500	2,06	2,22	1,94	1,53	1,68	1,42
3150	1,93	3,33	1,79	1,42	1,56	1,31
4000	1,75	1,90	1,65	1,39	1,51	1,25
5000	1,50	1,64	1,41	1,22	1,39	1,11
6300	1,24	1,40	1,16	1,06	1,26	0,93
8000	1,00	1,12	0,93	0,87	1,05	0,72
10000	0,86	0,96	0,77	0,76	0,93	0,62
EDTmid	2,54			1,70		

Tabla 13 Valores de EDT para ambas aulas en tercios de octavas y valores medios.

Como podemos ver en los resultados de ambos tipos de aula, los valores medios de EDT son del orden de los valores medios de T, por lo que entrarían dentro de las recomendaciones de EDT.

5.5.5. Claridad de la voz.

En la Tabla 14 se pueden observar los valores para cada aula en tercios de octava y los valores medios del parámetro claridad de la voz (C_{50}).

Banda [Hz]	C_{50} Aulas Pequeñas [dB]			C_{50} Aulas Grandes [dB]		
	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo
100	-4,8	-2,6	-5,2	-4,3	-2,5	-4,7
125	-4,6	-2,4	-5,1	-3,0	-1,2	-3,5
160	-3,7	-1,3	-4,1	-2,4	-0,5	-2,9
200	-4,4	-2,1	-4,9	-2,4	-0,4	-2,9
250	-4,7	-2,4	-5,1	-2,9	-1,0	-3,4
315	-5,2	-2,9	-5,6	-2,6	-0,7	-3,1
400	-5,1	-2,9	-5,6	-1,9	0,2	-2,5
500	-4,7	-2,5	-5,2	-1,5	0,9	-2,0
630	-5,3	-3,0	-5,8	-1,6	0,5	-2,2
800	-5,6	-3,2	-6,0	-2,0	0,0	-2,5
1000	-5,5	-3,0	-5,9	-1,8	0,3	-2,3
1250	-5,1	-2,4	-5,6	-1,7	0,7	-2,2
1600	-4,4	-1,5	-5,1	-1,3	1,4	-2,0
2000	-3,9	-0,9	-4,7	-0,9	1,9	-1,8
2500	-3,6	-0,3	-4,4	-0,8	2,2	-1,6
3150	-3,2	0,4	-4,0	-0,5	2,6	-1,3
4000	-2,8	1,1	-3,6	-0,3	2,9	-1,2
5000	-1,8	2,3	-2,7	0,5	3,9	-0,5
6300	-0,7	3,6	-1,7	1,2	4,8	0,2
8000	0,7	5,1	-0,4	2,2	6,0	1,2
10000	1,4	5,8	0,3	2,7	6,4	1,6
C_{50} mid	-4,1			-1,1		

Tabla 14 Valores de C_{50} para ambas aulas en tercios de octavas y valores medios.

En este caso, las recomendaciones para el C_{50} establecen que cualquier valor superior a 2,5 dB puede considerarse como bueno. Como vemos en la Tabla 14, los resultados promedio para las aulas grandes y para las aulas pequeñas distan de este objetivo.

5.5.6. Definición

En cuanto a la definición los valores obtenidos son los presentes en la Tabla 15.

Banda [Hz]	D Aulas Pequeñas [%]			D Aulas Grandes [%]		
	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo
100	27,24	36,01	20,74	28,04	38,87	21,52
125	27,97	37,26	20,90	32,81	43,70	24,71
160	32,43	41,70	24,90	35,84	46,92	27,82
200	28,87	38,58	20,93	35,24	46,33	26,99
250	27,31	36,69	19,59	32,55	43,49	24,40
315	25,56	34,34	18,61	33,74	45,35	24,73
400	26,20	34,28	19,51	36,46	50,30	27,40
500	28,08	36,21	21,14	38,42	51,93	28,50
630	25,50	34,24	19,16	37,30	50,83	28,41
800	24,53	34,04	17,75	36,02	49,61	26,55
1000	24,95	34,24	18,30	36,71	49,09	25,96
1250	27,09	37,31	20,17	38,84	51,39	28,94
1600	30,59	40,65	25,14	41,59	52,71	30,63
2000	33,45	42,51	27,73	44,49	54,38	35,52
2500	35,03	46,65	27,77	45,04	54,95	34,64
3150	36,79	49,69	28,76	46,54	56,42	37,30
4000	39,22	54,97	29,58	47,25	58,90	35,81
5000	45,16	61,28	35,89	53,25	64,74	42,19
6300	52,46	67,59	43,81	59,47	69,89	52,66
8000	61,05	75,27	51,72	67,05	77,32	58,70
10000	65,89	79,63	56,32	71,80	79,80	64,01
Dmid(%)	26,52			37,57		

Tabla 15 Resultados de la simulación para la definición (D).

El valor recomendado para la definición es cualquiera que supere el 65 %. Como vemos, los resultados promedio obtenidos para ambos tipos de aula no cumplen con esta recomendación.

5.5.7. Pérdida de articulación de consonantes.

En la Tabla 16 se muestran los resultados de ALCons%, el cual nos proporcionan una de las mejores visiones de todos los parámetros en cuanto a inteligibilidad de palabra.

Banda [Hz]	ALCons% Aulas Pequeñas [%]			ALCons% Aulas Grandes [%]		
	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo
500	18,94	20,88	13,67	10,37	11,63	7,47
1000	22,25	24,01	15,38	11,03	12,25	8,06
2000	16,58	18,76	11,00	9,53	10,98	6,77

Tabla 16 Resultados de ALCons% para ambas aulas, calculados mediante el método de mayor precisión mostrado en la Ecuación (1.49).

Como podemos observar en la tabla vemos, según Peutz (Ecuación 1.49), que los valores medios de inteligibilidad de palabra para las aulas pequeñas son entre pobres y malos, dependiendo de la banda de frecuencia en cuestión, pero, sin embargo para el aula grande, los valores medios obtenidos de ALCons% se encuentran entre los considerados buenos debido a la influencia del material de fibra mineral. Esto es algo a destacar ya que nos permite pensar que quizás para el aula grande no se necesite una inversión económica tan elevada para mejorar las condiciones acústicas en su interior.

5.5.8. Índice de transmisión del habla

Los valores obtenidos del índice de transmisión de palabra, calculados mediante la simulación en EASE, son los reflejados en la Tabla 17.

Banda [Hz]	RASTI Aulas Pequeñas [%]			RASTI Aulas Grandes [%]		
	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo
500	0,41	0,47	0,39	0,52	0,58	0,50
1000	0,38	0,44	0,36	0,51	0,56	0,49
2000	0,43	0,51	0,41	0,53	0,60	0,51

Tabla 17 Resultados de RASTI para ambas aulas.

Al igual que el ALCons%, este parámetro es muy interesante a la hora de estudiar acústicamente una sala para la palabra. Nuevamente vemos que, comparando estos valores con los de la valoración subjetiva de la Tabla 3, los resultados para las aulas pequeñas se califican como pobres mientras que los obtenidos en las aulas grandes se consideran aceptables.

6. POSIBLES MEJORAS

6.0. Introducción

Este capítulo trata de describir las soluciones, mediante el acondicionamiento acústico de las aulas, a las deficiencias acústicas que han quedado reflejadas en el apartado 5.4. Para ello, se propondrán tres posibles soluciones para cada tipo de aula:

1. Solución óptima: la que idealmente proporciona el mejor acondicionamiento acústico a costa de una mayor inversión económica.
2. Solución económica: la que proporciona un aceptable compromiso entre calidad acústica y coste económico.
3. Solución con techo acústico: consiste en la eliminación del techo abovedado por un techo acústico para aulas que nos permitirá seguir ciertas pautas de diseño indicadas en el DB-HR con objeto de proporcionar buen confort acústico.

En los Apartados 6.1 y 6.2 se describen las tres soluciones para las aulas pequeña y grande, respectivamente. Además, en el Apartado 6.3 se realizará un presupuesto aproximado de las soluciones para proporcionar una visión económica de las mismas.

6.1. Aulas pequeñas.

6.1.1. Solución óptima

Con esta solución se busca conseguir los valores que más se aproximen a los recomendados, centrándonos especialmente en el tiempo de reverberación óptimo para este tipo de recintos y en la inteligibilidad de palabra.

Dado que, como ya se ha dicho, uno de los parámetros en los que nos hemos centrado es el elevado tiempo de reverberación se decidió disminuir el mismo aumentando la absorción en las aulas. Para ello, y dado que son las superficies con un mayor área dentro del recinto, los lugares donde se ha aumentado dicha absorción han sido el techo y las paredes.

Para aumentar la absorción del techo se ha optado por instalar una lámina absorbente de espuma de poliuretano (*IPACELL*) la cual podemos ver en la Figura 86 y cuyos valores de absorción y de *scattering* son los que vemos en la Figura 87.



Figura 86 Lámina absorbente de espuma de poliuretano IPACELL.

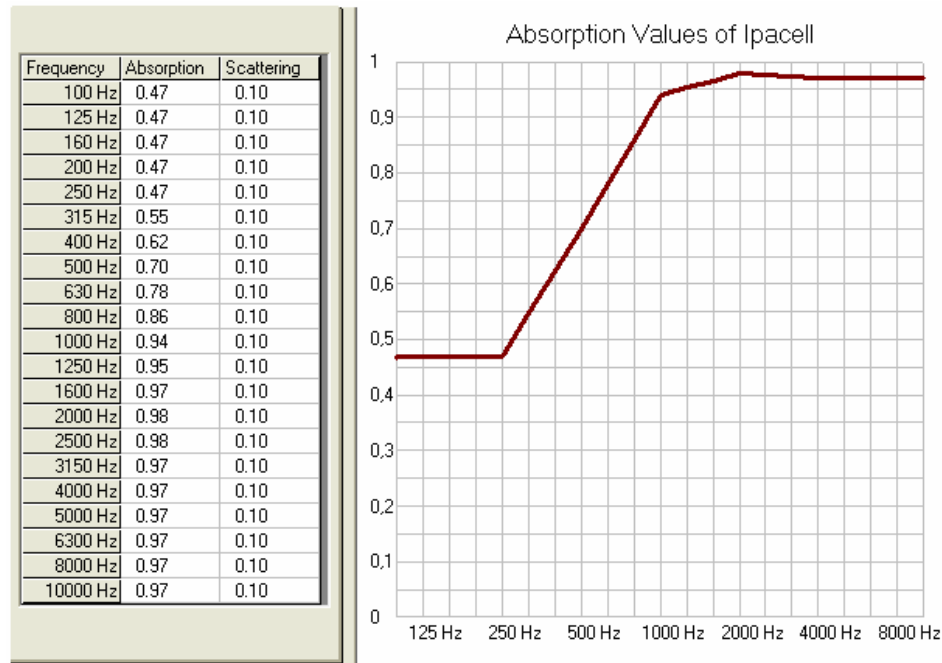


Figura 87 Coeficientes de absorción y de *scattering* de la lámina IPACELL.

Además, la disposición del mismo ha sido en forma de rejilla, como podemos ver en la Figura 88 en color rojo, para conseguir una distribución más heterogénea de los materiales y no tener un exceso de absorción en las aulas.

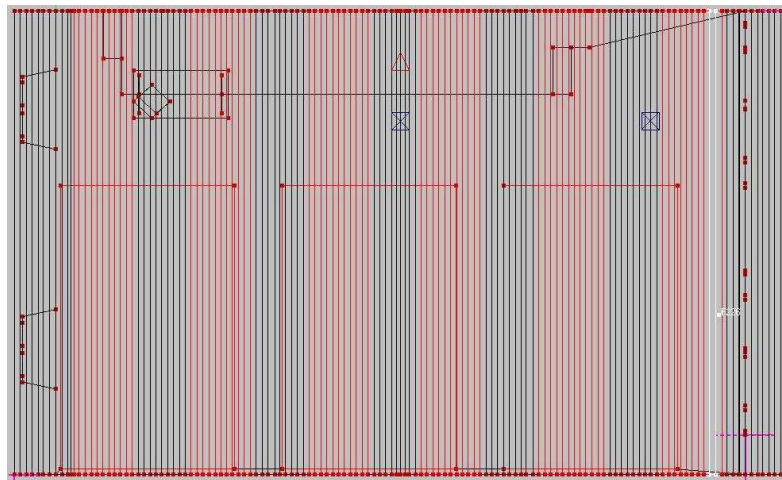


Figura 88 Vista cenital de la colocación del material absorbente en el techo.

Sin embargo, con la colocación de este material no se obtuvo los niveles recomendados de absorción, sobre todo en baja frecuencia. Para conseguir un tiempo de reverberación óptimo en las aulas se optó por sustituir en la media parte trasera del aula el zócalo de material plástico por unos paneles fonoabsorbentes (Figura 88) con una cámara de aire de 40 mm que mejoró, hasta conseguir el objetivo, tanto el tiempo de reverberación como la inteligibilidad de la palabra.

Además de esto, se cubrió parte de la pared trasera con los mismos paneles fonoabsorbentes (Figura 89). La disposición final de los mismos podemos verla en la Figura 90.



Figura 89 Panel absorbente ETOILE.

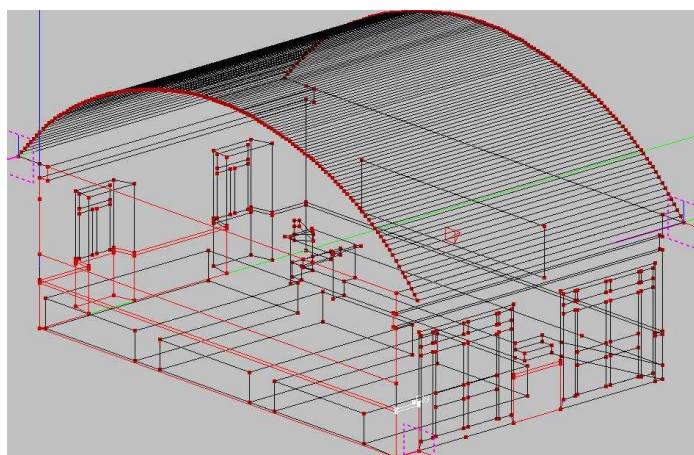


Figura 90 Colocación de los paneles absorbentes ETOILE.

Los coeficientes de absorción y de scattering de estos paneles absorbentes son los que vemos en la Figura 91.

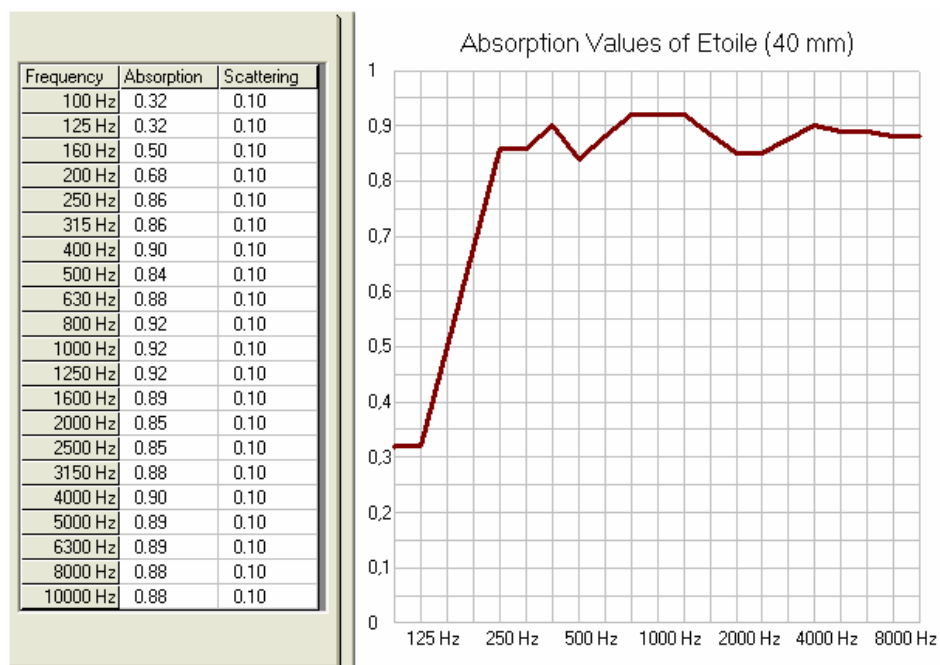


Figura 91 Coeficientes de absorción y de *scattering* de los paneles ETOILE.

Por tanto, los resultados obtenidos con esta selección y distribución de materiales son los que podemos observar en la Tabla 18.

Solución Óptima						
Banda (Hz)	T [s]	EDT [s]	D [%]	C ₅₀ [dB]	ALCons % [%]	RASTI
100	1,24	1,24	48,33	-1,0		
125	1,23	1,23	48,50	-0,9		
160	1,02	1,03	54,51	0,3		
200	0,97	0,99	55,86	0,7		
250	0,90	0,93	58,45	1,3		
315	0,88	0,89	60,01	1,4		
400	0,82	0,82	63,36	1,9		
500	0,79	0,78	65,08	2,2	6,04	0,62
630	0,76	0,75	66,36	2,4		
800	0,72	0,71	67,81	2,7		
1000	0,69	0,67	69,48	3,0	5,51	0,63
1250	0,67	0,66	71,63	3,4		
1600	0,67	0,64	74,06	3,7		
2000	0,66	0,63	75,72	4,0	4,92	0,66
2500	0,64	0,61	75,91	4,1		
3150	0,62	0,58	77,16	4,4		
4000	0,60	0,58	77,13	4,6		
5000	0,57	0,52	81,04	5,2		
6300	0,53	0,49	83,79	5,9		
8000	0,49	0,44	87,35	6,7		
10000	0,45	0,42	88,71	7,2		
X mid	0,74	0,73	67,28	3,6		
			BRILLO	0,85		
			CALIDEZ	1,44		

Tabla 18 Resultados de la solución óptima para las aulas pequeñas.

Como vemos en la Tabla 18 todos los valores obtenidos después del acondicionamiento acústico del aula son mucho mejores que los que había antes de dicho acondicionamiento. Los valores medios para el tiempo de reverberación T, el tiempo inicial de decaimiento EDT, la definición D y la claridad C₅₀ se encuentran muy próximos a los valores recomendados (apartado 1.4) para aulas, además, la inteligibilidad de la palabra, representada por el ALCons% obtiene una calificación subjetiva **Excelente**, mientras que la representada por el RASTI obtiene una calificación **Buena** para la banda de 2 kHz y **Aceptable** para el resto.

Por otro lado, el valor obtenido para el Brillo se encuentra dentro de la recomendación ($\geq 0,8$), mientras que el valor de la Calidez está un poco por encima de los valores óptimos ($1,3 \leq BR \leq 1,3$).

Además de esto, en la Figura 92, podemos ver representado el tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava junto al valor objetivo (línea granate) y los márgenes de tolerancia estándar (líneas negras). El tiempo de reverberación objetivo representa el valor de T_{mid} que queremos para el aula bajo estudio, mientras que los márgenes de tolerancia estándar nos marcan la desviación promedio que pueden sufrir los valores del tiempo de reverberación para cada una de las bandas de frecuencia.

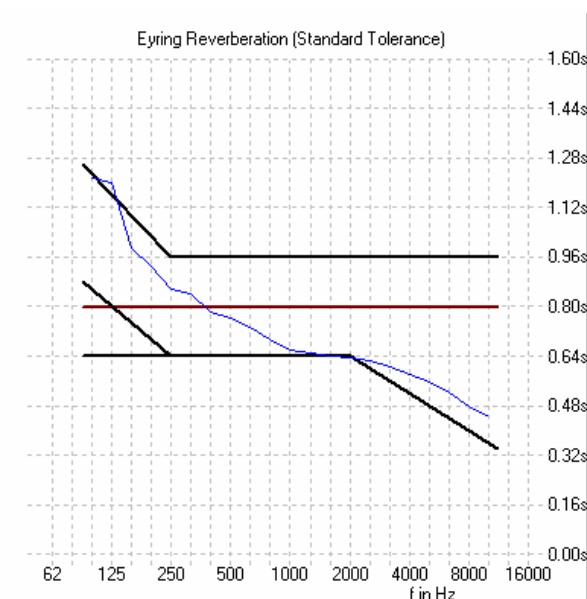


Figura 92 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución óptima en aulas pequeñas.

Como vemos, todos los valores del tiempo de reverberación se encuentran dentro del margen de tolerancia estándar, salvo para la banda de 125 Hz que se encuentra un poco por encima. No obstante, esta desviación no es crítica ya que, no sólo se encuentra muy poco por encima de dicho margen, si no que, además, se da en una frecuencia que no contribuye a la inteligibilidad de palabra.

6.1.2. Solución económica

En un principio esta solución consistió en centrar la absorción del aula exclusivamente en el techo, por lo que se suprimieron los paneles fonoabsorbentes de las paredes. De este modo se consiguió reducir el coste económico total para el acondicionamiento acústico del aula a costa de obtener unos valores de tiempo de reverberación e inteligibilidad de la palabra algo peores a los valores estipulados para conseguir un buen confort acústico.

A la vista de que los resultados obtenidos fueron insuficientes se decidió incluir el material *ETOILE* en el semicírculo superior trasero que se encuentra entre la pared y el techo, con lo que se consiguió unos resultados aceptables aumentando un poco el coste final pero, aún así, disminuyendo el presupuesto de la solución óptima.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 19.

Solución Económica						
Banda (Hz)	T [s]	EDT [s]	D [%]	C ₅₀ [dB]	AL Cons% [%]	RASTI
100	1,42	1,44	43,19	-1,8		
125	1,40	1,42	43,75	-1,8		
160	1,22	1,26	47,94	-1,0		
200	1,18	1,22	48,63	-0,8		
250	1,12	1,18	50,50	-0,4		
315	1,09	1,15	51,45	-0,2		
400	1,01	1,10	53,71	0,3		
500	0,97	1,08	54,66	0,6	7,45	0,58
630	0,92	1,04	56,21	0,9		
800	0,87	1,02	57,15	1,2		
1000	0,82	0,97	59,04	1,5	6,63	0,60
1250	0,80	0,98	60,37	1,9		
1600	0,79	0,95	62,47	2,2		
2000	0,77	0,92	64,54	2,6	5,75	0,63
2500	0,76	0,90	65,09	2,7		
3150	0,73	0,90	65,25	2,9		
4000	0,70	0,83	67,00	3,2		
5000	0,66	0,75	70,55	3,8		
6300	0,62	0,69	74,64	4,5		
8000	0,55	0,59	79,34	5,4		
10000	0,50	0,51	83,06	6,0		
X mid	0,895	1,03	56,85	2,2		
		BRILLO	0,82			
		CALIDEZ	1,41			

Tabla 19 Resultados de la solución económica para las aulas pequeñas.

Como vemos en la Tabla 19, en esta solución el T_{mid} se encuentra un poco por encima del T_{mid} objetivo que se sitúa en los 0,8 s y el valor del EDT debería ser del orden del T_{mid} para conseguir una buena difusión. Por otro lado, como ya se comentó en el apartado 1.4, el valor objetivo para C_{50} debería ser cualquier valor por encima de 2,5 dB y para la Definición cualquier valor por encima del 65%. Ambas condiciones se cumplen a partir de 2000 Hz.

Además, la valoración objetiva para el ALCons% es **Excelente**, mientras que la valoración del RASTI desciende a los valores establecidos como **Aceptables** en todas las bandas de frecuencia. También vemos que el valor de Brillo se encuentra dentro de la recomendación mientras que el de Calidez está un poco por encima.

Por otro lado, en la Figura 93, podemos ver el tiempo de reverberación en función de la frecuencia junto al valor objetivo y los márgenes de tolerancia estándar.

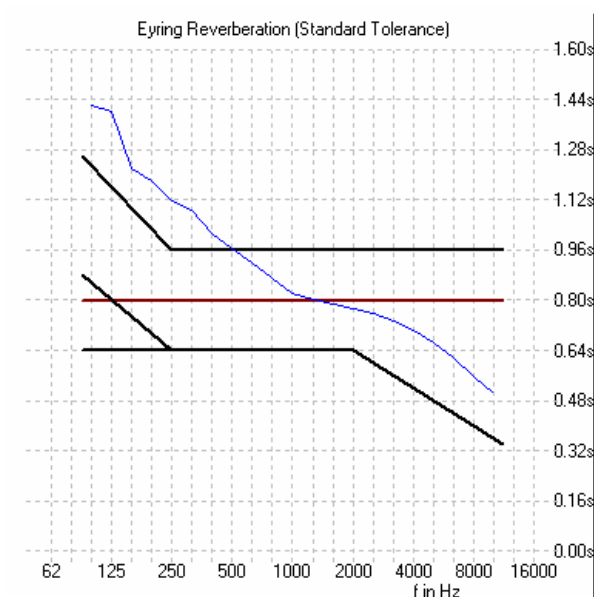


Figura 93 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución económica en aulas pequeñas.

Como vemos, con esta solución todos los valores por debajo de la banda de 500 Hz se encuentran por encima de los márgenes de tolerancia estándar para el tiempo de reverberación objetivo de 0,8 s (la curva de reverberación se situaría dentro de los márgenes de tolerancia estándar si el valor de T objetivo fuera algo mayor, en torno a 1 s). En cualquier caso, los resultados de inteligibilidad obtenidos son aceptables para la docencia.

6.1.3. Solución con Techo acústico

Finalmente, esta tercera solución persigue conseguir las características necesarias para ceñirnos a las recomendaciones del DB-HR, por lo que se estudian los resultados obtenidos a partir de la reducción del volumen del aula mediante la colocación de un techo acústico.

Cabe destacar que con esta solución sería interesante estudiar la influencia sobre la acústica del aula de la cavidad de aire que queda entre el techo acústico y el estructural. Esta cavidad puede dar pie a que se generen ondas estacionarias, sobre todo en baja frecuencia, que disminuyan la calidad acústica del aula. No obstante, por motivos de falta de tiempo no se ha llevado a cabo este estudio, dejándolo como trabajo futuro, y, por tanto, supondremos que el volumen de aire entre el techo acústico y el estructural no afecta a las medidas de calidad llevadas a cabo.

El material absorbente escogido para el techo acústico son los paneles ACUSTEC N-15 de Acústica integral que podemos ver en la Figura 94. Dichos paneles están contruidos a base de lana mineral y se presentan con un espesor de 15 mm y un tamaño, bien de 595 x 595 mm, o bien 1195 x 595 mm además, se colocan sobre una perfilaría metálica.



Figura 94 Paneles absorbentes ACUSTEC N-15.

Los valores de absorción y de *scattering* de estos paneles son los que vemos en la Figura 95.

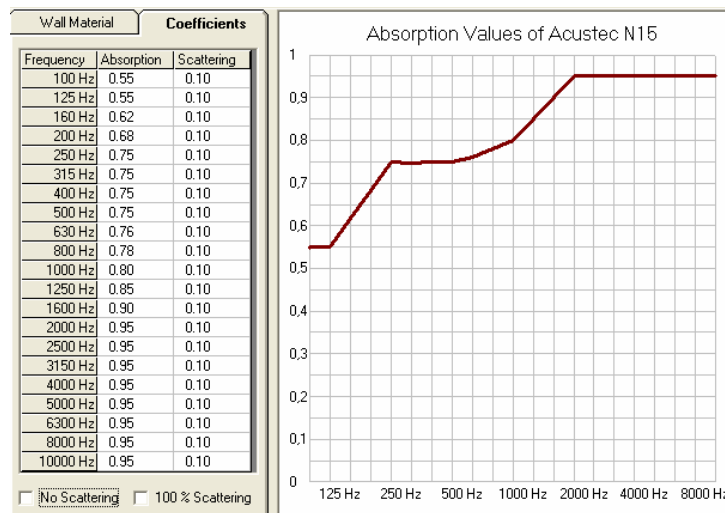


Figura 95 Coeficiente de absorción y de *scattering* de ACUSTEC N-15.

Los resultados, por tanto, obtenidos con esta última solución, y centrándonos en el documento básico de protección frente al ruido DB-HR, son los expresados en la Tabla 20.

Techo acústico						
Banda (Hz)	T [s]	EDT [s]	D [%]	C ₅₀ [dB]	AL Cons% [%]	RASTI
100	0,76	1,00	59,14	1,6		
125	0,76	0,99	58,95	1,6		
160	0,70	0,95	61,71	2,2		
200	0,63	0,91	64,64	2,9		
250	0,58	0,87	67,09	3,5		
315	0,59	0,91	65,85	3,4		
400	0,60	0,92	65,69	3,4		
500	0,60	0,98	63,11	3,4	5,31	0,64
630	0,59	0,93	64,62	3,5		
800	0,58	0,95	63,94	3,6		
1000	0,56	0,91	64,73	3,8	5,12	0,65
1250	0,52	0,91	67,15	4,5		
1600	0,49	0,86	70,24	5,2		
2000	0,45	0,80	73,20	6,1	4,12	0,69
2500	0,45	0,82	72,84	6,1		
3150	0,44	0,80	73,22	6,3		
4000	0,43	0,76	73,89	6,5		
5000	0,41	0,68	77,70	7,0		
6300	0,40	0,59	81,43	7,6		
8000	0,37	0,51	84,66	8,3		
10000	0,34	0,44	88,19	9,2		
X mid	0,58	0,95	63,92	5,2		
		BRILLO	0,76			
		CALIDEZ	1,16			

Tabla 20 Resultados de la solución con techo acústico para las aulas pequeñas.

Es importante destacar que con esta solución el volumen del aula se reduce considerablemente hasta situarse por debajo de los 350 m³, límite que establece el DB-HR [11] para que T_{mid} objetivo sea, en este caso, como mucho igual a 0,5 s.

Como vemos en la Tabla 20, los resultados para esta solución son los mejores de todos los que se han calculado hasta ahora. Parece lógico que sea así cuando esta es la solución que propone la norma.

En la Figura 96 vemos representado el tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava junto al valor objetivo y los márgenes de tolerancia estándar.

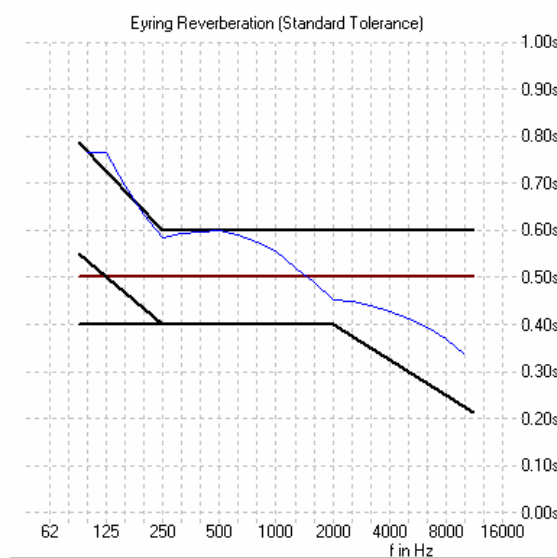


Figura 96 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución con techo acústico en aulas pequeñas.

En este caso, todos los valores, a excepción de los que están por debajo de la banda de 160 Hz, se encuentran dentro del margen de tolerancia estándar, por lo que podremos considerar esta solución con techo acústico como muy buena.

6.2. Aulas grandes

6.2.1. Solución óptima

En este caso ya partimos de una solución previa llevada a cabo mediante el aumento de absorción con fibras minerales. Como, aún así, no se consiguen valores óptimos para la inteligibilidad de la palabra se optó por instalar láminas *IPACELL* en el techo, al igual que en las aulas pequeñas, y, además, sustituir el zócalo original de la parte trasera del aula por paneles *ETOILE*.

Además, se ha decidido eliminar la fibra mineral del semicírculo de la parte delantera del aula para no sufrir un exceso de absorción en éstas y conseguir, así, una mejor distribución de los materiales. Otro beneficio que se consigue por el hecho de eliminar este material de fibra mineral es que una parte delantera del aula reflectante favorece la llegada de primeras reflexiones potentes para, de este modo, reforzar el sonido directo.

La distribución de estos materiales absorbentes podemos verla en la Figura 97.

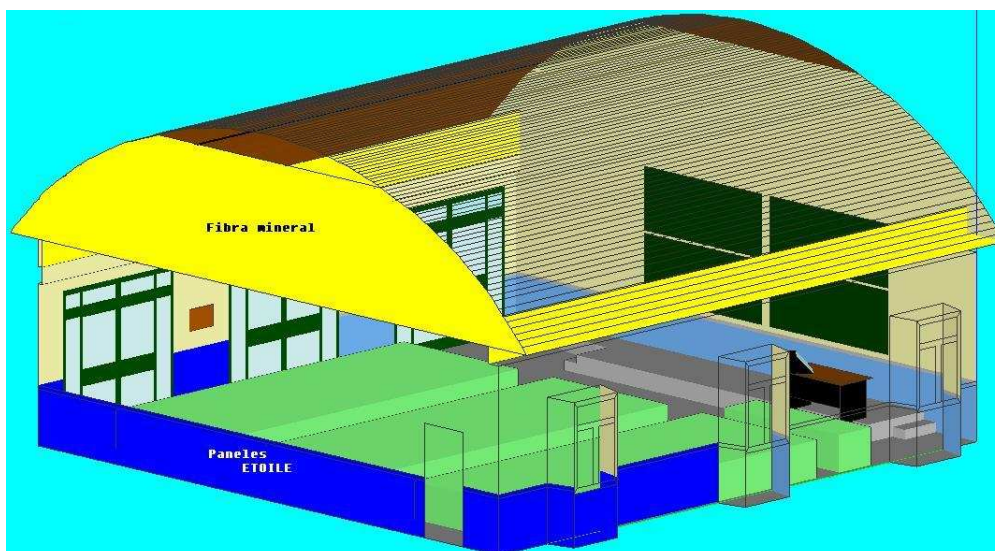


Figura 97 Distribución de materiales absorbentes en las aulas grandes.

Y los resultados obtenidos gracias a ello están reflejados en la Tabla 21.

Solución Óptima						
Banda (Hz)	T [s]	EDT [s]	D [%]	C ₅₀ [dB]	AL Cons% [%]	RASTI
100	1,38	1,52	41,97	-1,7		
125	1,22	1,40	44,56	-1,1		
160	1,11	1,30	46,88	-0,5		
200	1,07	1,27	47,46	-0,2		
250	1,09	1,30	46,73	-0,3		
315	1,00	1,20	49,39	0,2		
400	0,90	1,12	52,56	1,0		
500	0,83	1,05	55,05	1,5	6,61	0,60
630	0,80	1,02	56,37	1,8		
800	0,77	1,01	57,05	1,9		
1000	0,72	0,94	59,41	2,3	6,03	0,62
1250	0,72	0,96	60,72	2,5		
1600	0,70	0,95	62,62	2,9		
2000	0,69	0,90	65,34	3,3	5,35	0,64
2500	0,68	0,92	65,44	3,3		
3150	0,66	0,88	65,70	3,6		
4000	0,65	0,85	66,27	3,7		
5000	0,61	0,77	70,73	4,3		
6300	0,58	0,72	74,62	4,9		
8000	0,52	0,62	79,84	5,7		
10000	0,49	0,55	83,10	6,2		
X mid	0,78	1,00	57,23	2,9		
			BRILLO	0,86		
			CALIDEZ	1,49		

Tabla 21 Resultados de la solución óptima para las aulas grandes.

Como vemos en la tabla, tanto T, como Definición, siguen estando dentro de los valores objetivo. No obstante, vemos que EDT y C₅₀ se alejan un poco, sin que esta desviación sea preocupante. Además, los valores tanto de ALCons%, se encuentran entre los considerados **Excelentes** mientras que el RASTI está en el rango **Aceptable**. Por otro

lado, tanto el Brillo como la Calidez se encuentran a niveles próximos al del resto de soluciones.

En la Figura 98 vemos el tiempo de reverberación en bandas de tercios de octava además del valor objetivo y los márgenes de tolerancia estandar.

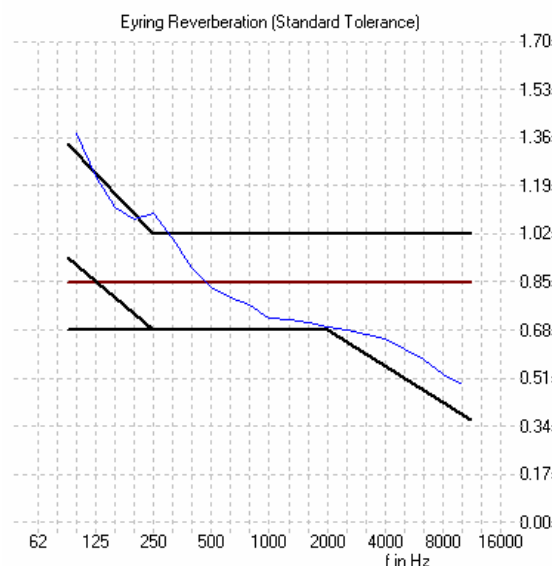


Figura 98 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estandar para la solución óptima en aulas grandes.

Como vemos, T se encuentra dentro de los márgenes de tolerancia estandar para casi todas las bandas de frecuencia, pero esta vez nos encontramos con una par de valores por encima en la bandas de 250 Hz y 100 Hz.

El motivo de estas diferencias con respecto a la gran calidad de la solución óptima del aula pequeña puede ser que, al ser un aula más grande la influencia del campo reverberante en los puntos más alejados de la fuente primaria (el profesor) aumenta y, por consiguiente, se produce una pérdida mayor en la inteligibilidad de la palabra. Una forma de subsanar este problema podría ser la implantación de un sistema de refuerzo sonoro en las zonas de la audiencia alejadas del orador, que típicamente está situado sobre el estrado. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el aumento de las fuentes de señal en el recinto implica también un aumento del nivel del campo reverberante, de modo que esos altavoces de refuerzo se deberían colocar a una distancia respecto del área de la audiencia tal que la influencia del campo directo producido por esos altavoces sea mayor que la del campo reverberante. Esta tarea podría plantearse como trabajo futuro.

6.2.2. Solución económica

Al igual que en la solución óptima se parte de la base de que ya hay un aumento de absorción previo, por lo que se decide mantener la absorción en el semicírculo entre pared y techo delantero e instalar únicamente las láminas *IPACEL* en el techo, con el mismo planteamiento que la solución óptima, reduciendo el coste y obteniendo los resultados que vemos en la Tabla 22.

Solución Económica						
Banda (Hz)	T [s]	EDT [s]	D [%]	C ₅₀ [dB]	AL Cons% [%]	RASTI
100	1,49	1,62	39,95	-2,2		
125	1,31	1,49	42,67	-1,5		
160	1,24	1,42	44,20	-1,1		
200	1,24	1,45	43,69	-1,1		
250	1,31	1,50	42,14	-1,4		
315	1,19	1,41	45,01	-0,8		
400	1,06	1,29	48,22	-0,1		
500	0,96	1,23	51,09	0,6	7,52	0,55
630	0,92	1,18	52,14	0,8		
800	0,89	1,17	52,97	0,9		
1000	0,83	1,09	55,20	1,3	6,83	0,57
1250	0,83	1,08	57,07	1,6		
1600	0,80	1,09	59,14	2,0		
2000	0,78	1,05	61,66	2,4	5,93	0,60
2500	0,77	1,07	60,89	2,5		
3150	0,75	1,01	62,11	2,6		
4000	0,73	0,96	62,86	2,8		
5000	0,69	0,87	67,68	3,4		
6300	0,64	0,78	72,09	4,0		
8000	0,58	0,65	77,85	4,9		
10000	0,53	0,57	81,67	5,4		
X mid	0,90	1,16	53,15	1,9		
BRILLO			0,84			
CALIDEZ			1,46			

Tabla 22 Resultados de la solución económica para las aulas grandes.

Con esta solución, como vemos en la Tabla 22, la calidad acústica conseguida desciende con respecto a la de la solución óptima, pero seguimos estando dentro de un margen aceptable para todos los parámetros acústicos descritos.

En cuanto a los valores del tiempo de reverberación con respecto al T objetivo y los márgenes de tolerancia estándar podemos verlo representado en la Figura 99.

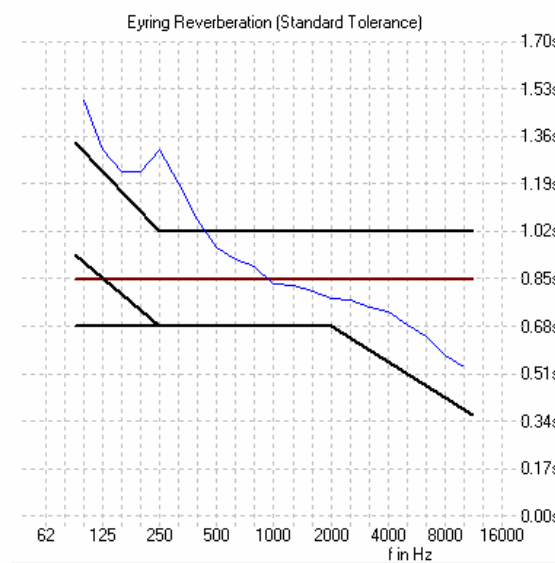


Figura 99 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estándar para la solución económica en aulas grandes.

En este caso, el tiempo de reverberación se encuentra dentro de los márgenes de tolerancia estándar salvo por debajo de la banda de 500 Hz, donde vemos un aumento notable. Este aumento es debido a la falta de absorción en baja frecuencia que presenta el acondicionamiento para abaratar costes.

6.2.3. Solución con techo acústico

Esta tercera y última solución, al igual que en las aulas pequeñas, consiste simplemente en instalar un techo acústico. Si bien, seguimos sin cumplir el DB-HR en cuanto al volumen total del aula, se persigue obtener unos valores de inteligibilidad óptimos, por lo que se decide establecer el tiempo objetivo de reverberación de 0,65 s. A pesar de que hay métodos empíricos que recomiendan un T en función del volumen y uso de la sala, se ha decidido fijar este valor, que es un valor ligeramente superior al recomendado por el DB-HR, ya que el volumen del aula grande es algo mayor que 350 m³.

Los valores obtenidos para esta solución se reflejan en la Tabla 23.

Techo acústico						
Banda (Hz)	T [s]	EDT [s]	D [%]	C ₅₀ [dB]	AL Cons% [%]	RASTI
100	0,77	1,06	58,72	1,5		
125	0,77	1,09	58,40	1,5		
160	0,70	1,04	60,77	2,2		
200	0,64	1,02	63,18	2,8		
250	0,59	0,99	65,25	3,4		
315	0,60	1,03	63,42	3,3		
400	0,60	1,07	62,33	3,3		
500	0,60	1,05	61,78	3,3	5,38	0,64
630	0,60	1,08	61,35	3,4		
800	0,58	1,06	62,00	3,5		
1000	0,56	1,07	61,23	3,7	5,23	0,64
1250	0,53	0,99	65,35	4,4		
1600	0,49	1,03	66,58	5,1		
2000	0,46	0,97	69,14	5,9	4,18	0,68
2500	0,45	0,96	69,45	6,0		
3150	0,44	0,89	71,25	6,2		
4000	0,43	0,88	70,76	6,4		
5000	0,42	0,77	74,92	6,8		
6300	0,40	0,69	79,23	7,4		
8000	0,37	0,59	83,77	8,1		
10000	0,34	0,45	87,98	8,9		
X mid	0,58	1,06	61,51	5,1		
			BRILLO	0,77		
			CALIDEZ	1,17		

Tabla 23 Resultados del techo acústico para las aulas grandes.

Como vemos, seguimos dentro del margen aceptable de valores pero, además, aumentamos la inteligibilidad de la palabra unas décimas con respecto a los conseguidos por las soluciones anteriores, por lo que cabría esperar que el confort acústico fuera mejor.

En cuanto a los valores del tiempo de reverberación, con respecto al valor objetivo y los márgenes de tolerancia estándar, podemos verlos en la Figura 100.

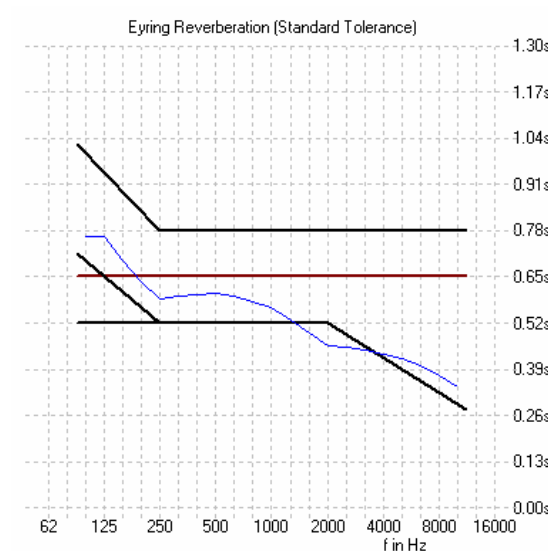


Figura 100 Tiempo de reverberación en bandas de tercio de octava, valor objetivo y márgenes de tolerancia estandar para la solución de techo acústico en aulas grandes.

En este caso vemos que todas las bandas de frecuencias, salvo de 1000 Hz a 2600 Hz, se encuentran dentro de los márgenes de tolerancia estándar.

Es importante destacar que el hecho de que se produzca una reducción drástica en un margen de frecuencias determinada es lógico cuando la absorción de un recinto se concentran en un solo punto y en un solo material, dado que no hay una buena distribución de los materiales y éstos suelen ser más eficientes en unos márgenes de frecuencias que en otros.

6.3. Presupuesto

6.3.1. Solución óptima

- PRESUPUESTO ACONDICIONAMIENTO ÓPTIMO -**Cliente**Nombre *Universidad Carlos III de Madrid*Dirección *Avenida de la Universidad*Ciudad *Leganés*Provincia *Madrid***Descripción***Acondicionamiento acústico ÓPTIMO de 20 aulas**en el Edificio Sabatini de la Universidad**Carlos III de Madrid***AULAS PEQUEÑAS (x12)****Materiales**

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (€)	TOTAL(€)
63	Paneles absorbentes ETOILE 20 mm (1,2mx0,6m)	14,89	938,07
3	Rollo autoadhesivo IPACELL 25 mm (1,5mx16m)	423,12	1.269,36
3	Adhesivo de contacto Bostik 1465 0,5 ml	6,25	18,75
Subtotal			2.226,18

Mano de obra

Cantidad	Descripción	Precio hora(días)	TOTAL(€)
1	Capataz de obra	15(8hx3d)	360,00
2	Peones de obra	10(8hx3d)	480,00
1	Inspección Ingeniero Técnico	25(4hx1d)	100,00
Subtotal			940,00

Otros

Descripción	% sobre Material	TOTAL(€)
Gastos generales	10	222,62
Beneficio Industrial	6	133,57
Subtotal		356,19

Nº aulas	SUBTOTAL	3522,37
	12	

TOTAL PEQUEÑAS	42.268,43 €
-----------------------	--------------------

AULAS GRANDES (x8)

Materiales

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (€)	TOTAL(€)
70	Paneles absorbentes ETOILE 20 mm (1,2mx0,6m)	14,89	1.042,30
5	Rollo autoadhesivo IPACELL 25 mm (1,5mx16m)	423,12	2.115,60
4	Adhesivo de contacto Bostik 1465 0,5 ml	6,25	25,00
Subtotal			3.182,90

Mano de obra

Cantidad	Descripción	Precio hora(días)	TOTAL(€)
1	Capataz de obra	9(8hx4d)	480,00
2	Peones de obra	6(8hx4d)	640,00
1	Inspección Ingeniero Técnico	15(4hx1d)	100,00
Subtotal			1.220,00

Otros

Descripción	% sobre Material	TOTAL(€)
Gastos generales	10	318,29
Beneficio Industrial	6	190,97
Subtotal		509,26

	SUBTOTAL	4912,16
Nº aulas	8	

TOTAL GRANDES 39.297,31 €

TOTAL

TOTAL AULAS PEQUEÑAS		42.268,43 €
TOTAL AULAS GRANDES		39.297,31 €
Realización Proyecto ¹⁰ (% Materiales)	30	1.622,72 €
SUBTOTAL		83.188,46 €
Impuestos (%)	18	14.973,92 €
TOTAL		98.162,38 €

¹⁰ Tanto por ciento aplicado por la realización del estudio acústico y diseño del acondicionamiento.

6.3.2. Solución económica

- PRESUPUESTO ACONDICIONAMIENTO ECONÓMICO -**Cliente**

Nombre *Universidad Carlos III de Madrid*
 Dirección *Avenida de la Universidad*
 Ciudad *Leganés*
 Provincia *Madrid*

Descripción

*Acondicionamiento acústico ÓPTIMO de 20 aulas
 en el Edificio Sabatini de la Universidad
 Carlos III de Madrid*

AULAS PEQUEÑAS (x12)**Materiales**

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (€)	TOTAL(€)
37	Paneles absorbentes ETOILE 20 mm (1,2mx0,6m)	14,89	550,93
3	Rollo autoadhesivo IPACELL 25 mm (1,5mx16m)	423,12	1.269,36
2	Adhesivo de contacto Bostik 1465 0,5 ml	6,25	12,50
Subtotal			1.832,79

Mano de obra

Cantidad	Descripción	Precio hora(días)	TOTAL(€)
1	Capataz de obra	9(8hx2d)	240,00
2	Peones de obra	6(8hx2d)	320,00
1	Inspección Ingeniero Técnico	15(2hx1d)	50,00
Subtotal			610,00

Otros

Descripción	% sobre Material	TOTAL(€)
Gastos generales	10	183,28
Beneficio Industrial	6	109,97
Subtotal		293,25

Nº aulas	SUBTOTAL	2736,04
	12	

**TOTAL
PEQUEÑAS** **32.832,44 €**

Estudio acústico de las aulas abovedadas en el Edificio Sabatini de la UC3M

AULAS GRANDES (x8)

Materiales

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (€)	TOTAL(€)
5	Rollo autoadhesivo IPACELL 25 mm (1,5mx16m)	423,12	2.115,60
		Subtotal	2.115,60

Mano de obra

Cantidad	Descripción	Precio hora(días)	TOTAL(€)
1	Capataz de obra	9(8hx1,5d)	180,00
2	Peones de obra	6(8hx1,5d)	240,00
1	Inspección Ingeniero Técnico	15(2hx1d)	50,00
		Subtotal	470,00

Otros

Descripción	% sobre Material	TOTAL(€)
Gastos generales	10	211,56
Beneficio Industrial	6	126,94
	Subtotal	338,50

	SUBTOTAL	2924,10
Nº aulas	8	

TOTAL GRANDES 23.392,77 €

TOTAL

TOTAL AULAS PEQUEÑAS		32.832,44 €
TOTAL AULAS GRANDES		23.392,77 €
Realización Proyecto (% Materiales)	30	1.184,52 €
SUBTOTAL		57.409,72 €
Impuestos (%)	18	10.333,75 €
TOTAL		67.743,47 €

6.3.3. Techo acústico

- PRESUPUESTO TECHO ACÚSTICO -**Cliente**

Nombre *Universidad Carlos III de Madrid*
 Dirección *Avenida de la Universidad*
 Ciudad *Leganés*
 Provincia *Madrid*

Descripción

*Acondicionamiento con TECHO ACÚSTICO de 20 aulas
 en el Edificio Sabatini de la Universidad
 Carlos III de Madrid*

AULAS PEQUEÑAS (x12)**Materiales**

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (€)	TOTAL(€)
110	Paneles de lana de roca 30 kg/m3 (135x60x4 cm)	4,57	502,70
120	Placas ACUSTEC N-15 (1195,x 5,95 cm)	5,15	618,00
120	Perfiles en T	4,98	597,60
2	Caja 200 Piezas de cuelgue TR	32,71	65,42
1	Otros (material)		750,00
Subtotal			2.533,72

Mano de obra

Cantidad	Descripción	Precio hora(días)	TOTAL(€)
1	Capataz de obra	9(8hx4d)	480,00
2	Peones de obra	6(8hx4d)	640,00
1	Inspección Ingeniero Técnico	15(4hx2d)	100,00
Subtotal			1.220,00

Otros

Descripción	% sobre Material	TOTAL(€)
Gastos generales	10	253,37
Beneficio Industrial	6	152,02
Subtotal		405,40

Nº aulas	SUBTOTAL	4159,12
	12	

**TOTAL
PEQUEÑAS** **49.909,38 €**

Estudio acústico de las aulas abovedadas en el Edificio Sabatini de la UC3M

AULAS GRANDES (x8)

Material

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (€)	TOTAL(€)
172	Paneles de lana de roca 30 kg/m3 (135x60x4 cm)	4,57	786,04
195	Placas ACUSTEC N-15 (119,5x 5,95 cm)	5,15	1004,25
160	Perfiles en T	4,98	796,8
3	Caja 200 Piezas de cuelgue TR	32,71	98,13
1	Otros (material)		950,00
Subtotal			3.635,22

Mano de obra

Cantidad	Descripción	Precio hora(días)	TOTAL(€)
1	Capataz de obra	9(8hx3,5d)	420,00
2	Peones de obra	6(8hx3,5d)	560,00
1	Inspección Ingeniero Técnico	15(3hx3d)	225,00
Subtotal			1.205,00

Otros

Descripción	% sobre Material	TOTAL(€)
Gastos generales	10	363,52
Beneficio Industrial	6	218,11
Subtotal		581,64

Nº aulas	SUBTOTAL	5421,86
	8	

TOTAL GRANDES 43.374,84 €

TOTAL

TOTAL AULAS PEQUEÑAS		49.909,38 €
TOTAL AULAS GRANDES		43.374,84 €
Realización Proyecto (% Materiales)	30%	1.850,68 €
SUBTOTAL		95.134,91 €
Impuestos (%)	18	17.124,28 €
TOTAL		112.259,19 €

En la Figura 101 podemos ver un resumen de los presupuestos de las distintas soluciones.

	Solución Óptima	Solución Económica	Techo Acústico
Aulas Pequeñas	42.268,43 €	32.832,44 €	49.909,38 €
Aulas Grandes	39.297,31 €	23.392,77 €	43.374,84 €
TOTAL	98.162,38 €	67.743,47 €	112.259,19 €

Figura 101 Resumen de presupuestos.

7. Conclusiones y trabajo futuro

7.0. Introducción

Este proyecto fin de carrera ha consistido en el estudio de las condiciones acústicas de las aulas abovedadas que se encuentran en la tercera planta del Edificio Sabatini de la Universidad Carlos III de Madrid en Leganés. Además, se han propuesto diversas soluciones para mejorar dichas condiciones mediante acondicionamiento acústico.

7.1. Resumen

A lo largo de este proyecto han quedado reflejadas las pésimas condiciones acústicas que estas aulas poseen teniendo en cuenta su uso, así como la necesidad de elaborar un trabajo de acondicionamiento acústico en las mismas. Además, es importante destacar la necesidad de proponer diferentes soluciones que relacionen calidad acústica y coste económico debido al gran número de aulas a acondicionar.

El trabajo llevado a cabo en este caso ha consistido, en primer lugar, en el estudio pormenorizado de diferentes teorías acústicas que estudian el comportamiento de recintos cerrados y los distintos parámetros de interés en aulas para la palabra.

A continuación, se ha hecho un repaso de la normativa vigente, en cuanto a salas para la palabra, para tener una visión objetiva de cómo solucionar los diversos problemas que han surgido. Posteriormente, se han descrito los dos tipos de aulas, pequeñas y grandes, para poder conocer perfectamente la geometría y construcción de las mismas.

El siguiente paso ha consistido en medir “in situ” el tiempo de reverberación y el ruido de fondo que nos ha servido para hacernos una idea inicial de las condiciones acústicas de las aulas y para, a continuación, ajustar los modelos hechos en EASE. Una vez ajustados estos modelos se han llevado a cabo las simulaciones que nos han permitido calcular los parámetros acústicos descritos en el Capítulo 2.

Finalmente, y como cierre a este proyecto, se han propuesto tres soluciones de acondicionamiento acústico (óptima, económica y techo acústico) buscando, entre numerosos fabricantes, los materiales óptimos para cada caso y proporcionando un posible presupuesto para poder tener una visión económica del problema y poder decidir en consecuencia.

7.2. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos, tanto económicos, en cuanto a los presupuestos proporcionados, como acústicos, a través del estudio acústico realizado mediante las mediciones “in situ” y las simulaciones, llegamos a la conclusión de que la mejor opción calidad/precio es, sin duda, la solución óptima.

Cabe destacar que si el presupuesto del cliente en cuestión no se adecua a esta solución, existe una solución económica con la cual se consiguen niveles aceptables de inteligibilidad de la palabra, por lo que podría ser una solución de compromiso entre la calidad acústica objetivo y la capacidad económica del cliente pero, sin olvidar como bien se ha dicho, que no se conseguirán unos resultados óptimos.

Por otro lado, parece evidente que se puede descartar por completo la solución mediante la instalación de un techo acústico, por un lado, por el elevado coste que ella supone, y por otro, porque plantea problemas que se escapan al objetivo de este proyecto, como la influencia de la cámara de aire entre el techo acústico y el estructural. Además, esta solución modificaría notablemente la geometría, y por tanto, la estética de las aulas, por lo que es mucho más agresiva que las otras soluciones propuestas.

7.3. Trabajo futuro

Por último, a parte de la hipotética ejecución de la obra, como líneas de trabajo futuro destacamos las siguientes:

- Llevar a cabo un estudio sobre la influencia del volumen de aire entre el techo acústico y el estructural en la acústica del aula.
- Mejorar todavía más las condiciones de inteligibilidad en las aulas mediante la implantación de sistemas de refuerzo sonoro que permitan la correcta distribución del mensaje hablado.
- Un estudio del aislamiento acústico de las superficies límite es otra de las líneas futuras de trabajo abiertas por este proyecto.

Bibliografía

- [1] Antoni Carrión Isbert, “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Ediciones UPC, 1998.
- [2] Manuel Recuero López, “Acondicionamiento acústico”. Paraninfo, 2001.
- [3] Dolores García Escribano, “Estudio acústico de una sala polivalentes” PFC
- [4] Manuel Recuero López, “Acústica arquitectónica aplicada”. Paraninfo, 1999
- [5] César Díaz Sanchidrián, “Sobre la utilización de los coeficientes de absorción de los materiales en la expresión de Eyring del tiempo de reverberación de una sala”. Publicación S.E.A.
- [6] Manuel Recuero López, “Acústica de estudios de grabación sonora”. Instituto oficial de radio televisión española, 1985.
- [7] Constantino Gil López, “Introducción a las salas para la palabra”. Dpto. de publicaciones de la E.U.I.T. de Telecomunicación, 2010.
- [8] J. A. Mastroizzi, C. Montes, S. Amura, M. A. Mastroizzi, “Estudio y pautas para el acondicionamiento acústico de aulas de edificios para la educación”. Gabinete de Investigación y Vinculación Tecnológica de la Universidad Argentina John F. Kennedy, 2004.
- [9] Higini Arau, “ABC de la acústica arquitectónica”. Ediciones CEAC, 1999.
- [10] Manuel Recuero López, Constantino Gil Gonzalez “Acústica Arquitectónica”, 1993.
- [11] Código Técnico de la Edificación, “Documento Básico de Protección frente al ruido DB-HR”, Septiembre 2009.
- [12] Jorge Grundman Isla, “Estudio del campo sonoro por ordenador”. Dpto. de publicaciones de la E.U.I.T. de Telecomunicación, 2001.
- [13] UNE-EN ISO 3382-2, “Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios”, 2008.
- [14]<http://sketchup.google.com/3dwarehouse/details?mid=8a345825bef2a9fab62ee1e4d2fa6ce6>
- [15] J.M. del Moral Fernández, M. Ortega Cano, C. de Castro Carranza, E. Gaite Domínguez, “Determinación del índice de inteligibilidad de un recinto mediante la relación señal-ruido y el tiempo de reverberación”. Publicación Tecniacústica. 1997.
- [16] A. Vela, M. Arana, “Inteligibilidad del aula magna de la E.T.S.A. de la U.P.V en San Sebastian”. Publicación Teniacústica. 1993.
- [17] R. Pérez Amezuá, C. Rico Rodríguez, C. de Castro Carranza, E. Gaite Domínguez, “Estudio de la inteligibilidad de la palabra en el salón de actos de la E.U.P. de Valladolid”. Publicación Tecniacústica. 1994.
- [18] Fransec Daumal i Domènech, Diana Möler Parera. “Acondicionamiento acústico de la sala de actos de la ETSEIB”. Publicación Tecniacústica. 1995.
- [19] Cesar Díaz Sanchidrián, “Sobre la utilización de los coeficientes de absorción de los materiales en la expresión de Eyring del tiempo de reverberación de una sala”. Revista de acústica de la Universidad Politécnica de Madrid.
- [20] Luis Enrique Mora Cheza, Mario Cevallos Villacreses, “Diseño de sala de locución y acondicionamiento acústico”. Escuela Politécnica Nacional de Ecuador.

- [21] Samuel Siltanen, “Geometry Reduction in Room Acoustics Modeling”. Department of Computer Science Telecommunications Software and Multimedia Laboratory of Helsinki University of Technology. 2005.
- [22] ODEON Room Acoustics Program User Manual. Version 10.0.
- [23] T. J. Cox, B. I. L. Dalenback, P. D. Antonio, J. J. Embrechts, J. Y. Jeon, E. Mommertz, M. Völander, “A tutorial on Scattering and Diffusion Coefficients for Room Acoustics Surfaces. Acta Acústica United with Acustica. 2006.
- [24] Michael Völander, “Performance of computer simulations for architectural acoustics”. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA. 2010.
- [25] Patricia Marqueta Campos, Nestor Varela Campelo, “Manual EASE”. Universidad Pública de Navarra.
- [26] Catálogo de productos absorbentes de Metrasoni “www.metrasoni.es”.
- [27] Catálogo de techos acústicos de Pladur “www.pladur.com”.
- [28] Catálogo de productos absorbentes de Acústica integral “www.acusticaintegral.com”.
- [29] Catálogo de productos absorbentes de Isover “www.isover.net”.
- [30] Foro de estudiantes de la Sociedad Española de Acústica “www.sea-acustica.es”.

